OKTOBER 2004 · € 6,90 (D/A)

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

> Kometen und Asteroiden

> Freuds Rückkehr

> Organische Leuchtdioden

> Sensornetze für die Umwelt

> ESSAY: Bandwürmer

www.spektrum.de

Eine Siedlung an einem See beleuchtet das Leben des Menschen vor 370 000 Jahren

HOMO ERECTUS

Der Urmensch von Thüringen

D6179E
13,50 sFr/Luxemburg 8,– €

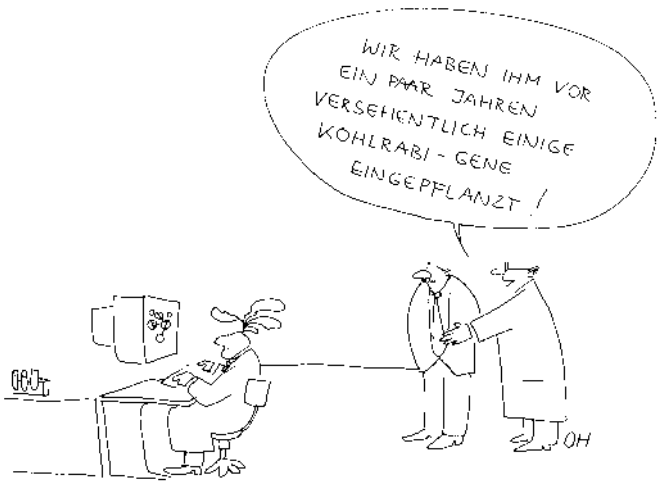
Reinhard Breuer
Chefredakteur

Vom künstlichen und echten Leben

Als wir die Themen für dieses Heft zusammenstellten, schien uns einen Augenblick, dass es doch zu einseitig werden könnte: Zukunft des Lebens, Experimente zu »künstlichem« Leben, Bandwürmer – insgesamt zu viel »Bio«? Denn an der Ausgewogenheit unter den wichtigsten Forschungsgebieten liegt uns ebenso viel wie an der Aktualität und Güte der Inhalte. Doch dann sahen wir die Chance, gerade mit dieser Gewichtung ein interessantes Magazin zu gestalten. Denn jeder dieser Beiträge präsentiert neue Resultate der Grundlagenforschung, die alle in zentralen Punkten unser Weltbild berühren und es womöglich verändern.

Evolution: »Bandwürmer haben ihren eigenen Reiz«, bekennt ein Paläontologe in seinem Essay auf S. 110. Bandwürmer, so seine Überlegung, müssen lediglich »zur rechten Zeit am rechten Ort« sein. Sie sind so eng mit dem Schicksal ihres Wirts verbunden, dass der komplexe Lebenszyklus dieser Parasiten auch Rückschlüsse auf ihren Wirt ziehen lässt. Das greift unmittelbar zurück bis zu den Urahnen der Menschheit. Da Bandwürmer meist Fleischfresser besiedeln, lässt sich damit etwa untersuchen, wann Hominiden zu Fleischessern wurden und welche Beutetiere sie verzehrten – ungewohnte Betrachtungen für die Evolutionsforschung.

ANZEIGE



Künstliches Leben: Als Folge der Gentechnik und der erfolgreichen Entzifferung zahlreicher Genome entstand ein Forschungszweig, der sich inzwischen »Synthetische Biologie« nennt. Eine rasch wachsende Gruppe von Forschern vor allem in den USA will Zellen so umprogrammieren, dass sie etwa bei Landminen im Boden aufleuchten (und den Sprengstoff gleich abbauen), ein bislang zu teures Malariamittel absondern oder Schwermetalle ausfällen. Im Juni trafen sich die Experten am MIT in den USA zu ihrer ersten Tagung »Synthetic Biology 1.0«. Ihrem Ziel vom »Leben Version 2.0« nähern sie sich offenbar schneller, als Skeptiker wahrhaben wollen (S. 68).

Zukunft des Lebens: Seit langem schon verkünden Astrophysiker das Ende der Erde, sobald die Sonne sich zum Roten Riesen aufbläht – eine Sache von Jahrmilliarden. Spätestens dann, wenn die Gashülle unseres sterbenden Sterns die Venus verschluckt, wird auch unser Planet zum leblosen, verbrannten Steinklumpen. Was jetzt ein Wissenschaftlerteam in einer detaillierten Simulation unserer Biosphäre vorlegt, zeigt, dass es mit dem Leben bereits wesentlich früher, eher schon in einigen hundert Millionen Jahren, auf dramatische Weise zu Ende geht. Ein Abtritt von der kosmischen Bühne in Raten – jetzt nicht mehr nur eine Sache für Sciencefiction-Autoren (S. 52).

INHALT

SPEKTROGRAMM

10 Altindianische Metropole · Feuermelder nach Käferart · Schaltbarer Klebstoff · Riesenechse mit Wachstumsschub u. a.

13 **Bild des Monats**
Stielaugen lügen nicht

FORSCHUNG AKTUELL

16 **Neandertaler verspeisten Höhlenlöwen**
Das zeigen Schnittspuren an 47 000 Jahre alten Raubtierknochen aus Südbayern

20 **Dunkle Energie bremst Computer aus**
Eine kosmische Grenze für die Leistung irdischer Rechner

22 **Bin ich das?**
Ein wenig Täuschung und man hält einen künstlichen Arm für den eigenen

24 **DNA-Baugerüst mit Einfädelhelfer**
Im Prinzip einfach, in der Praxis komplex: die Replikation der Erbsubstanz

26 **Schutzimpfung für Pflanzen**
Künstlich übertragene Antikörper immunisieren Getreide gegen Pilze

THEMEN

▶ **30** **Planetensysteme im Werden**
Wie Astronomen Kometen und Asteroiden in fernen Sternsystemen aufspüren

▶ **38** TITEL **Leben des Frühmenschen**
Homo erectus – ein versierter Jäger und Handwerker

52 **Der Hitzetod der Erde**
Wie die Sonne unseren Planeten dereinst unbewohnbar macht

▶ **64** **Leuchtdioden aus Kunststoff**
Der Traum vom Bildschirm, der sich zusammenrollen lässt, rückt näher

68 **Synthetisches Leben**
Biomaschinen sollen Nutzen bringen

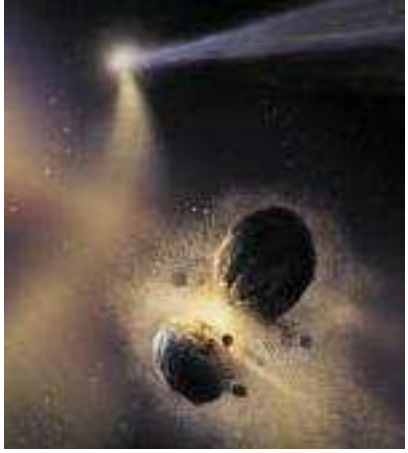
▶ **76** **Freuds Rückkehr**
Die Psychoanalyse erweist sich neuerlich als wertvoll

▶ **86** **Sensornetze**
Selbstorganisierende Verbände von Kleinstcomputern

▶ **110** **Essay: Zeugen der Menschwerdung**
Bandwürmer dokumentieren Wandel in der Ernährungsweise des Frühmenschen

Titelbild: Die längste Zeit, seit es Menschen gibt, lebte der *Homo erectus*. Er schuf sich bereits seine eigene Umwelt und Kultur, wie zwei Fundplätze in Deutschland beweisen
Plastische Rekonstruktion und Foto eines Homo erectus: W. Schnaubelt und N. Kieser – Atelier Wildlife Art; Titelgestaltung: Siganim / Spektrum der Wissenschaft

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet



SEITE 30

ASTROPHYSIK

Suche nach der Nadel in stellaren Staubhaufen

Um zu klären, ob fremde Planetensysteme kleinere Himmelskörper wie Kometen und Asteroiden enthalten, müssen Astronomen vor allem eines tun: im Staub herumstochern

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

SEITE 52

ZUKUNFT DES LEBENS

Das Ende des Raumschiffs Erde

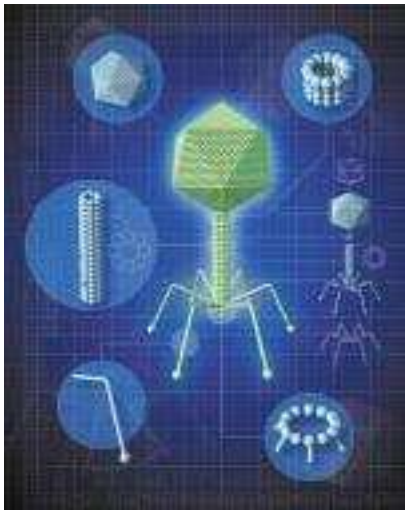
Eine immer stärker strahlende Sonne wird das irdische Leben in einigen 100 Millionen Jahren auslöschen. Wissenschaftler können den schrittweisen Untergang der Biosphäre inzwischen detailliert vorhersagen

SEITE 64

OLEDS

Displays von der Rolle

Ein Großbildschirm, der sich bequem in der Tasche verstauen lässt? Leuchtdioden aus Kunststoff sollen es möglich machen

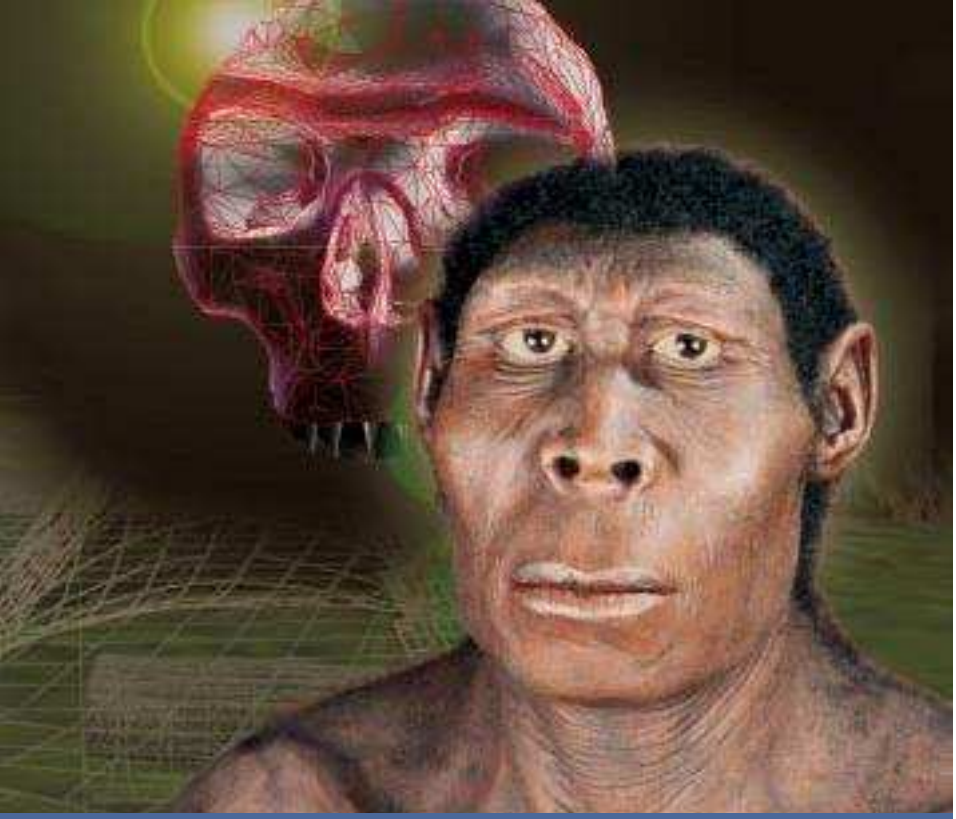


SEITE 68

SYNTHETISCHE BIOLOGIE

Künstliche Biomaschinen

Sie sollen Schwermetalle abbauen, Wirkstoffe erzeugen und Krebszellen vernichten – künstliche Mikroorganismen, konstruiert von Geningenieuren. Doch vorläufig ringen die Konstrukteure noch um die Stabilität ihrer Geschöpfe



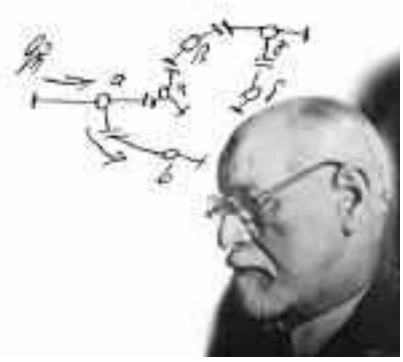
TITELTHEMA *HOMO ERECTUS* SEITE 38

Der Urmensch von Thüringen

Vor 370 000 Jahren lebten an einem See im heutigen Thüringen Urmenschen. Der Leiter des internationalen Teams, das die Grabungen und Analysen durchführte, schildert die Befunde aus 35 Jahren Forschung

INTERVIEW Jagdwaffen und -strategien des *Homo erectus* SEITE 48

SEITE 76



PSYCHOANALYSE

Freuds Wiederkehr

Auch Neurowissenschaftler brauchen eine umfassende Theorie des Psychischen. Dabei gerät Freuds altes Modell erneut in die Diskussion

SEITE 86

SENSORNETZE

Die kollektive Intelligenz der Kleinstcomputer

Sie sind winzig, leistungsschwach und stets knapp mit Energie. Aber im Verbund ergeben sie ein Forschungs- und Überwachungsinstrument mit ganz besonderen Qualitäten

SEITE 110

SPEKTRUM-ESSAY

Bandwürmer – Zeugen der Menschwerdung

Die Bandwürmer des Menschen stammen aus der afrikanischen Savanne

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

REZENSIONEN

95 **Genesis** von Claude Nuridsany und Marie Pérennou
Dr. Bertlmanns Socken von Shimon Malin
Am anderen Ende des Mikroskops von Elmer W. Koneman
Der Tod der Madame Curie von Franz M. Wuketits
Mehr Wissen über … Stammzellen von Eberhard J. Wormer
Das Ei des Kolumbus von Heinrich Hemme
Konrad Lorenz von Klaus Taschwer und Benedikt Föger
Mythos Nordpol von Jean Malaurie

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

106 **Ziemlich einfache Maschinen**

KOMMENTAR

23 **Nachgehakt**
Der Fall Kuba und die Biotechnologie

WISSENSCHAFT IM …

62 **Alltag:** Ein Herz aus Stein

84 **Unternehmen:** Sicherheit auf den Punkt gebracht

94 **Rückblick:** Phöbe tanzt aus der Reihe · Erfrischt nach Strombetäubung u. a.

WEITERE RUBRIKEN

3 Editorial · 6 Leserbriefe/Impressum · 113 Preisrätsel · 114 Vorschau

SPEKTRUM-PLUS.DE
ZUSATZANGEBOT NUR FÜR ABONNENTEN

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Maria Sibylla Merian

Kunst, pietistische Naturauffassung und exakte Wissenschaft gingen im Werk der großen Forscherin eine einzigartige Synthese ein

ZUGÄNGLICH ÜBER WWW.SPEKTRUM-PLUS.DE NACH ANMELDUNG MIT ANGABE DER KUNDENNUMMER

LESERBRIEFE

Bruder Affe – oder doch nur Vetter?

Forschung Aktuell, Juli 2004

Auf den ersten zwei Seiten des Artikels finden sich die üblichen Zahlenspielereien der Genetiker. Auf der dritten steht dann aber doch der Schlüsselsatz, nämlich: »Tatsächlich liegt ein Großteil des Unterschieds ... nicht in den Genen selbst, sondern in dem Plan, nach dem sie in Aktion treten ...« Der reduktionistische Ansatz »Ein Gen = eine Eigenschaft des fertigen Organismus« sollte ja endlich überwunden sein. Wie sich ein Gen ausprägt, wird erst in der Embryonalentwicklung festgelegt. Auf diesem Gebiet steht aber die Forschung noch am Anfang. Hier hilft der Computer auch weniger als bei der Zahlengenetik.

Ohnehin können Ähnlichkeiten oder Unterschiede zwischen Lebewesen gar nicht quantitativ, sondern nur qualitativ beschrieben werden. Mit Letzterem beschäftigt sich die Verhaltensforschung. Natürlich hat die Genetik große Bedeutung. Wollen wir aber wissen, wie ähnlich sich Affe und Mensch sind, dann müssen wir das bei Frans de Waal oder Shigeru Watanabe nachlesen, nicht bei Craig Venter.

Allerdings erfahren wir dann nicht, vor wie vielen Jahren sich die beiden Vettern (oder doch Brüder?) getrennt haben.

Felix Thommen, Regensdorf

Streit um das Ende der Dinosaurier

August 2004

Rätselhaftes Sterbemuster

Im Einzelnen wäre zu prüfen, warum das Ereignis dazu führte, dass zum Beipiel Krokodile, Schildkröten, Vögel, Säugetiere und Fische überlebten, die Saurier, Flugsaurier, Ammoniten und andere dagegen nicht (bei den Pflanzen ist die Datenlage sicher schlechter). Die Größe kann es nicht sein, denn ein großes Tier kann einen längeren Zeitraum überleben als ein kleines, welches, um den Stoffwechsel aufrechtzuerhalten, fast täglich Nahrung aufnehmen muss. Und dazu bedarf es ganzer Nahrungspyramiden und nicht nur einzelner Tiere beziehungsweise Pflanzen.

Ein großer Saurier hätte sicher Monate ohne Nahrung auskommen können, wenn ein Mensch dies ungefähr einen Monat kann. Krokodile und Schildkröten sind dazu noch viel länger in der Lage (abhängig von Art, Alter, Ernährung und anderem), aber kleine Vögel eben nur Tage.

Und damit bekommen die globalen Winter- und Brennszenarien ihr Probleme.

Joachim Lorenz, Karlstein

NASA / JPL / DONALD E. DAVIS

▲ Besiegelte der Einschlag eines kosmischen Geschosses das Ende der Dinosaurier?

Unglaubwürdige Statistik

Insgesamt ist es ein interessanter Aufsatz, der es schafft, Fakten, Histörchen und Meinungen unterschiedlicher Gebiete zusammenzufassen und vorurteilsfrei darzustellen. Das Hin und Her der Theorien habe ich selten so übersichtlich präsentiert gesehen; jede wurde mit einer Person verbunden, was das Thema aus der Kiste der trockenen Theorien holt und den Lesegenuss erhöht.

Die Grafik »Der Untergrund des Kraters«, die für mich besonders interessant sein sollte, stellt jedoch nur einen Teil einer Theorie dar – und ist womöglich bereits überholt. Jeder Geologe weiß, dass eine einzige Bohrung in einem komplizierten Gebiet nur einen Bruchteil der Information liefert, um eine Grafik wie die auf S. 67 zu gestalten. Die notwendige Ergänzung – etwa durch geoseismische Daten – wird im Aufsatz leider nur gestreift. Gerade hier hätte ich mehr erwartet, da die Größe des Kraters eines der wichtigsten Argumente für die Behauptung ist, dass dieser Einschlag das Ende der Kreidezeit eingeläutet hat.

Ich selbst glaube nicht den Kleinkrämern, die im statistischen Mittel nur alle 100 Millionen Jahre ein Geschoss erlauben, das die Erde trifft. Je größer ein Brocken ist, desto leichter kann er durch Gezeiteneffekte beim Passieren der Sonne zerbrechen – und schon ▷

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg (kom. Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Naghib, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 104840, D-69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Peter John, Dr. Rainer Kayser, Dr. Frank Scholz, Dr. med. Hermann Schultz.
Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: marketing@spektrum.com

Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o Zenit Pressevertrieb GmbH, Postfach 810680, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)

Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Hartmut Brendt, Tel. 0211 6188-145, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Gerlinde Volk, Postfach 102663, D-40017 Düsseldorf, Tel. 0211 88723-76, Fax 0211 374955
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, D-10117 Berlin, Tel. 030 61686-144, Fax 030 6159005; Hamburg: Siegfried Sippel, Burchardstraße 17/I, D-20095 Hamburg, Tel. 040 30183-163, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: fs//partner, Stefan Schließmann, Friedrich Sültemeier, Bastionstraße 6a, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0211 862997-0, Fax 0211 132410; Frankfurt: Klaus-Dieter Mehnert, Eschersheimer Landstraße 50, D-60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 242445-38, Fax 069 242445-55; Stuttgart: Dieter Drichel, Werastraße 23, D-70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-24, Fax 0711 22475-49; München: Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15/IV, D-80331 München, Tel. 089 545907-30, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0711 88723-87, Fax 0211 374955

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 25 vom 01.01.2004.
Gesamtherstellung: Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.
Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2004 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.
Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.
Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: John Sargent, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg, Vice President and International Manager: Dean Sanderson

ANZEIGE

ANZEIGE

▷ haben wir einen Schrot-Effekt: eine Perlenreihe kosmischer Geschosse. Wenn nur eine Hand voll davon nacheinander die Erde treffen – darunter das von Chicxulub als eines der größten, aber nicht unbedingt als größtes –, vervielfachen sich die Auswirkungen. Der Motor der Konvektion würde alle Beweise nach und nach wieder vernichten. Die Erdoberfläche ist zu zwei Dritteln mit Meer bedeckt. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Meteorit oder ein Bruchstück ins Meer fällt, ist dementsprechend hoch.

Frank G. Gerigk,
Leinfelden-Echterdingen

Die Krux mit dem Sex

August 2004

Es ist schon erstaunlich, dass beim Vergleich »sexuell – asexuell« ein wichtiges Prinzip im Pflanzenreich komplett ignoriert wird. Der Standard bei höheren Pflanzen ist »Zwitter« (also bisexuell und nicht »sexuell« oder »asexuell«, wie Wills einen Zwitter definiert!), und damit ist das ganze Lamentieren über die Anzahl der Nachkommen unnütz, denn zwischen Zwittern und Asexuellen besteht hier kein Unterschied. Die eigentliche Frage, die sich der Autor aber nicht stellt, wäre, warum in der Tierwelt bis auf wenige Ausnahmen keine echten Zwitter existieren.

Pflanzensamen als sexuelle Produkte und Sprossung als asexuelle Vermehrung miteinander zu vergleichen, ist ebenfalls alles andere als seriös, weil beide Formen auf völlig unterschiedliche Verbreitungs- sowie Startstrategien setzen.

Prof. Gilbert Brands, Krummhörn

Das Loch im Walfisch

Rezensionen, Juli 2004

In seiner Buchbesprechung referiert Professor Wickler die Meinung, die Biologie sei »zumindest unabhängig von den physikalischen Wissenschaften«. Man könnte das als Definition sehen: von dem großen Projekt, Strukturen und Prozesse des Lebens zu verstehen, ist Biologie nur der Teil, der keine Physik braucht.

Es gibt allerdings die große Zahl von Physiologen, Biochemikern und Biophysikern sowie Physikochemikern, die mit physikalischem Gerät und ebensolcher Theorie die Klärung biologischer Fragestellungen betreiben. Noch mehr, sie sind erst zufrieden, wenn es ihnen gelingt, ein Phänomen physikalisch zu erklären und zu verstehen.

Bedeutet Verstehen nicht das Aha-Erlebnis, dass ein einzelner Befund sich plötzlich wie selbstverständlich in das schon als richtig erfahrene Weltbild fügt? In der Biologie vermittelt die chemische Einsicht oft dieses Erlebnis, und dem physikalisch Gebildeten wird sogar das zu Grunde liegende Netz physikalischer Gesetze deutlich, welches die Kohärenz unserer Naturwissenschaften konstituiert.

PD Dr. Jürgen Schlitter, Bochum

Skalenfreie Netze

Juli 2004

Diesen Beitrag fand ich besonders wichtig, da hier über ein fundamentales Prinzip berichtet wird, das in der Computerwelt eine zunehmende Rolle spielt.

In der Software arbeiten heute viele selbstständige Organisationseinheiten, so genannte Objekte, zusammen. Diese stehen untereinander in einer netzwerkartigen Beziehung, insbesondere wirken manche Objekte wie Hubs, stehen mit vielen anderen Objekten in direkter Beziehung. Ein Angreifer kann genau deshalb ein Computersystem derart massiv stören, weil die Software im Rechner nach dem »little World«-Prinzip organisiert ist. Gelingt es einem Virus, die Funktion eines Hubs anzugreifen, hat das System kaum mehr die Möglichkeit sich davon zu erholen.

Möglicherweise führt die Entwicklung neuartiger Softwarekonzepte, die dieses Problem berücksichtigen, indem sie Aufgaben innerhalb des Rechners besser verteilen, zu wesentlich stabileren Systemen.

Prof. Dr. Eduard Heindl, Furtwangen

Titelbild

Juli 2004

Mit der Übernahme von Filmplakaten auf die Titelseite haben Sie endgültig Ihren Anspruch auf Ernsthaftigkeit verloren.

Dr. G. Steffen, per E-Mail

Briefe an die Redaktion …

… richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
D-69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com
Fax: 06221 9126-729

SPEKTROGRAMM

ARCHÄOLOGIE

Altindianische Metropole

Eine stattliche Mauer mit drei bis zu zehn Meter hohen Wachtürmen schützte die etwa 10000 Einwohner von Gran Saposoa, der wohl ältesten Stadt der Chachapoya-Indianer in Peru. Vermutlich im 7. Jahrhundert erbaut, erstreckte sich die einstige Metropole über eine Fläche von fast 65 Quadratkilometern. Gene Savoy, Bischof, Archäologe und Entdecker mehrerer früherer Indiostädte, hatte sie 1999 in den abgelegenen, unzugänglichen Nebelwäldern 540 Kilometer nördlich von Peru aufgespürt. Nun leitete sein Sohn – auch er im Hauptberuf Seelsorger – eine Expedition in das Areal, das bei den Peruanern als »Augenbraue des Dschungels« bekannt ist. Allein sechs Tage brauchte die Truppe für die Anreise per Bus, Maultier und schließlich zu Fuß. Doch die Strapazen lohnten sich: Das vierzigköpfige Team stieß auf fünf neue Stadtbezirke mit Hunderten für die Chachapoya typischen Rundbauten, die mit zahlreichen Schnitzereien und Wandmalereien in Form einfacher Muster aus Kreuzen, Rhomben, Spiralen oder Sonnen verziert waren. Besonderen Aufschluss über das Leben der als hochgewachsen und hellhäutig geltenden Chachapoya erhoffen sich die Forscher von den Mumien, die sie in den Felsnischen der Stadtmauer fanden. Das wenig bekannte Indiovolk wurde vermutlich gegen Ende des 15. Jahrhunderts – noch vor der Ankunft der Spanier – von den Inkas besiegt. *(AP, 18.8.2004)*

▶ Von den in Gran Saposoa entdeckten Mumien und Gerätschaften – hier ein Krug – erhoffen sich die Forscher neue Erkenntnisse über das Leben der Chachapoya.

BIONIK

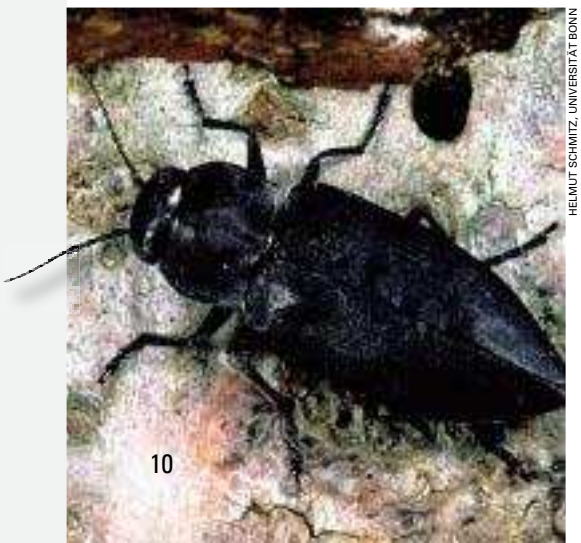
Feuermelder nach Käferart

Noch aus einer Entfernung von achtzig Kilometern kann er, so heißt es, einen Waldbrand aufspüren: der Schwarze Kiefernprachtkäfer *(Melanophila acuminate)*. Winzige Wärmefühler auf seiner Unterseite machen es möglich. Sie bestehen aus Fortsätzen von Mechanorezeptoren, die fingerartig in Kügelchen aus dem Panzermaterial Chitin hineinragen.

Diese Kugeln absorbieren die bei einem Waldbrand frei werdende charakteristische Wärmestrahlung einer Wellenlänge von etwa drei Mikrometern. Dabei dehnen sie sich stark aus und reizen so die druckempfindlichen Sensoren. Interessanterweise nutzt der Käfer seinen Wärmesinn nicht etwa, um sich vor Waldbränden in Sicherheit zu bringen – im Gegenteil: Die Weibchen sind gezielt auf der Suche nach Feuerherden, um nach dem Erlöschen der Flammen ihre Eier in die verkohlte Rinde zu legen und sich damit einen von Konkurrenten unbehelligten Brutplatz zu sichern.

Martin Müller und Helmut Schmitz von der Universität Bonn ließen sich von dem tierischen Sensorsystem nun zur Konstruktion eines Feuermelders inspirieren, der deutlich preiswerter sein sollte als heutige Geräte. An Stelle der Chitin-Kugeln verwendeten sie Polyethylen-Plättchen, die Wärmestrahlung im gleichen Wellenlängenbereich wie ihr natürliches Vorbild absorbieren und sich dabei ebenfalls ausdehnen. Ihr Prototyp erreicht zwar noch nicht die Empfindlichkeit handelsüblicher Infrarotsensoren, aber die Forscher sehen reichlich Spielraum für Verbesserungen.

(Journal of Comparative Physiology, im Druck))



HELMUT SCHMITZ, UNIVERSITÄT BONN

◀ Nutznießer von Waldbränden: Das Weibchen des Schwarzen Kiefernprachtkäfers legt seine Eier auf verkohlter Rinde ab.

TECHNIK

Schaltbarer Kleber

Schon mancher Heimwerker dürfte ihn sich gewünscht haben: einen Klebstoff, dessen Haftwirkung an- und ausschaltbar ist. Edward De Meter von der Pennsylvania State University hat diesen Wunschtraum nun erfüllt. Allerdings ist sein Wunderkleber primär für den industriellen Einsatz gedacht. Er soll Werkstücke zur Weiterverarbeitung vorübergehend in der richtigen Position halten – billiger und schonender als Magnete oder mechanische Greifer.

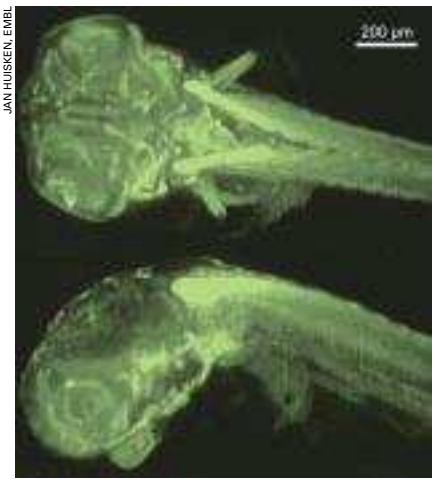
Das Erfolgsgeheimnis ist die Zugabe eines Farbstoffs, der Infrarotlicht absorbiert, zu einem UV-härtbaren Industriekleber. Ein Ultraviolettblitz lässt den Leim fest werden, während Wärmestrahlung die beim Härten geknüpften Bindungen wieder aufbricht. Die Haltevorrichtung besteht aus einer Stahlplatte mit runden Fenstern aus dem harten, chemisch resistenten und für UV-Licht transparenten Edelstein Saphir. Die angeklebten Werkstücke halten eine Belastung bis 3800 Kilogramm pro Quadratzentimeter aus – so viel wie ein Springseil, an dem ein Elefant hängt – und erwärmen sich nicht, weil der Kleber die IR-Strahlung komplett absorbiert.

(Pennsylvania State University, 18.8.2004)

ANDEAN EXPLORERS FOUNDATION

MIKROSKOPIE

Innenansichten lebender Organismen



JAN HUISKEN, EMBL

Das Innenleben dieses vier Tage alten Fischembryos ist mit dem neuen Mikroskop aus allen Blickwinkeln gut zu erkennen.

Mit einem neuen Fluoreszenzmikroskop können Wissenschaftler jetzt mehrere Millimeter tief in lebende Organismen hineinblicken. Noch bis weit in die zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts galt: Wer wissen wollte, wie es im Inneren eines Lebewesens aussah, musste es töten, in hauchdünne Scheiben schneiden und diese einzeln im Mikroskop anschauen. Eine Verbesserung brachten konfokale Mikroskope, die einen Laserstrahl sukzessive auf verschiedene Tiefenebenen fokussieren, diese abrastern und alles Streulicht aus anderen Schichten ausblenden. Dabei geht aber sehr viel Licht verloren, sodass ein tieferer Blick an mangelnder Helligkeit scheitert.

Das ändert sich bei der neuen Methode namens SPIM *(Selective Plane Illumination Microscopy)*, die Forscher um Ernst Stelzer am Europäischen Molekularbiologischen Laboratorium in Heidelberg entwickelt haben. Hier wird das Beobachtungsobjekt schrittweise durch einen »Vorhang« aus Laserstrahlung bewegt und senkrecht zu dieser Ebene jeweils das Streu- oder Fluoreszenzlicht registriert, wobei viel weniger davon verloren geht. Die entstehende Serie von Schnittbildern lässt sich per Computer zu einem dreidimensionalen Gesamtbild zusammensetzen. Um die Auflösung zu verbessern, kann man nacheinander Aufnahmen aus mehreren Blickwinkeln machen. »Mit SPIM lassen sich nun erstmals komplette Entwicklungsprozesse ›live‹ mikroskopisch verfolgen«, sagt Mitentwickler Jan Huisken. *(Science, 13.8.2004, S. 1007)*

MEDIZIN

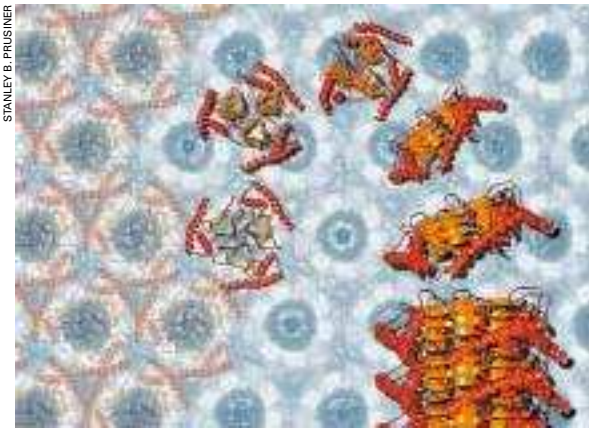
Prionenhypothese endlich bewiesen

Die Idee war kühn, ja ketzerisch: Einfache Eiweißmoleküle – so genannte Prionen – sollten den Rinderwahn oder das Creutzfeldt-Jakob-Syndrom hervorrufen: Infektionskrankheiten, in deren Endstadium das Gehirn löchrig ist wie ein Schwamm. Als Stanley Prusiner 1982 diese Behauptung aufstellte, stieß er weithin auf Skepsis. Doch allmählich mehrten sich die Belege dafür, und 1997 erhielt der einstige Ketzer sogar den Nobelpreis. Trotzdem fehlte bisher der letzte Beweis: die erfolgreiche Infektion eines Tiers mit einem künstlich hergestellten Prion, das mit Sicherheit nicht durch einen anderen Krankheitserreger verunreinigt ist.

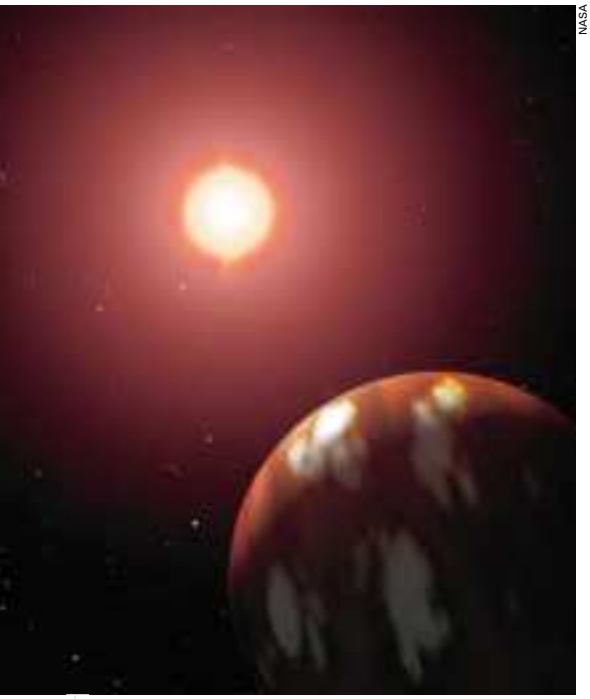
Jetzt endlich konnte Prusiner diesen Beweis erbringen – zumindest fast. Schon vor etlichen Jahren hatten er und sein Team ein ungefährliches Protein hergestellt, es im Reagenzglas in ein pathologisches Prion verwandelt und ins Gehirn lebender Mäuse injiziert. Um die notorisch lange Inkubationszeit abzukürzen, waren die sieben Versuchstiere allerdings genetisch so verändert, dass sie das harmlose Ausgangsprotein 16-mal so häufig produzierten wie normale Nager. Ein Jahr lang geschah nichts, und Prusiners Hypothese drohte löchrig zu werden.

Doch nach 380 Tagen erkrankte schließlich die erste Maus, und nach fast zwei Jahren zeigte auch die letzte eindeutige Symptome. Nun fehlt nur noch der Schlussstein: Die Infektion nicht genetisch veränderter Tiere mit reinen Prionen. *(Science, 30.7.2004, S. 673)*

Prionen (orange) sind falsch gefaltete Proteine, die harmlose Pendants (blau) zu Stapeln anlagern und ihnen die eigene Struktur aufzwingen.



STANLEY B. PRUSINER



NASA

ASTRONOMIE

Extrasolare Leichtgewichte

»Noch können wir die erdähnlichen Planeten nicht sehen, aber wir finden bereits ihre großen Brüder«, kommentiert Paul Buttler von der Carnegie Institution in Washington die Entdeckung von gleich drei neuen Sterntrabanten außerhalb des Sonnensystems (siehe auch S. 30). Das Besondere: Sie sind mit der vierzehn- bis zwanzigfachen Erdmasse sehr viel kleiner als die bisher aufgespürten extrasolaren Planeten. Der kleinste, den Didier Queloz von der Universität Genf identifizierte, umkreist mit einem größeren Objekt zusammen den Stern My Arae. Er liegt mit seiner Masse genau auf der Grenze zwischen einem Gasriesen und einem erdähnlichen »Gesteinsbrocken«.

Die zweite Neuentdeckung ist bereits der vierte Planet um den nur 41 Lichtjahre entfernten Stern 55 Cancri – ein Rekord. Als Drittes wurde ein kleiner Trabant um den roten Zwergstern Gliese 436 aufgespürt. Dieser Typ von Sternen, die leichter als die Sonne sind, kommt in der Milchstraße sehr häufig vor.

Alle drei Neuzugänge verrieten sich durch die winzigen periodischen Positionsschwankungen, die sie ihrem Stern aufzwangen und die in dessen Spektrum nachweisbar sind. Bei Umlaufzeiten zwischen nur 2,5 und 9,5 Tagen kreisen sie auf sehr engen Bahnen.

Der neu entdeckte Planet (vorn) um den Stern Gliese 436 – hier mit künstlerischer Fantasie dargestellt – hat nur etwa die Masse von Neptun.

PALÄONTOLOGIE

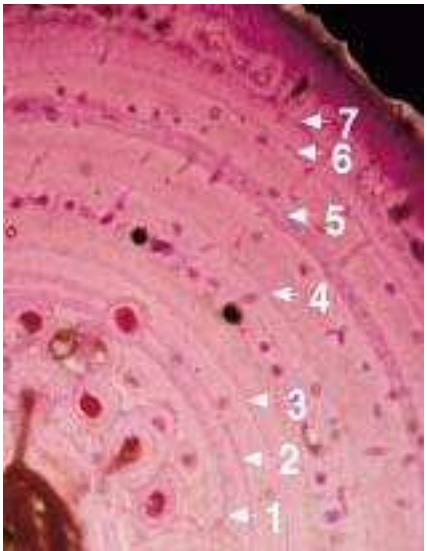
Riesenechse mit Wachstumsschub

Dass *Tyrannosaurus rex* ein Riese war, ist lange bekannt, nicht aber, wie er seine imposante Statur erreichte. Wuchsen die Tiere gleich den heutigen Reptilien stetig bis zu ihrem Tod oder wie die Säuger nur in ihrer Jugend? Wissenschaftler um Gregory Erickson von der Florida State University in Tallahassee fanden nun die Antwort.

In welchem Alter ein fossil erhaltener Dinosaurier gestorben ist, ermitteln Paläontologen üblicherweise anhand der Oberschenkelknochen. Dort lagert sich mineralische Substanz von Jahr zu Jahr ringförmig an. Wie bei Baumstämmen braucht man also nur diese Ringe abzuzählen, um das Lebensalter zu bestimmen. Allerdings versagt die Methode bei *Tyrannosaurus rex*, weil seine Oberschenkelknochen im Verlauf des Lebens hohl werden und die innersten Wachstumsschichten verlieren.

Erickson und seine Mitarbeiter stellten jedoch fest, dass andere, nicht tragende Skelettteile massiv bleiben und gleichfalls eine erkennbare Ringstruktur zeigen. Deshalb untersuchten sie Wadenbeine und Rippen von sieben *Tyrannosaurus*-Fossilien stark unterschiedlicher Größe. Wie sie fanden, war das jüngste Tier nur zwei, das älteste 28 Jahre alt geworden. Vor allem aber stellte sich heraus, dass der gigantische Raubsaurier wie der Mensch eine Art Wachstumsschub in der Pubertät erlebte: Zwischen 14 und 18 Jahren legte er täglich mehr als zwei Kilogramm zu und vervielfachte sein Gewicht von einer auf sechs Tonnen. Danach stellte er das Wachstum ein.
(Nature, 12.8.2004, S. 772)

Die Wachstumsringe im Wadenbein zeigen: Dieser Saurier wurde nur sieben Jahre alt.



GREGORY M. ERICKSON, FIELD MUSEUM

Mitarbeit: Dagny Lüdemann, Stephanie Hügler und Katharina Grund

RAUMFAHRT

Origami im All

JAXA

Japanische S-310-34-Rakete mit aufgefaltetem kleeblattförmigem Sonnensegel

Raumschiffe, die im Sonnenwind zu fernen Planeten segeln, könnten bald Wirklichkeit werden. Den Durchbruch schafften die Meister des Origami: Anfang August gelang es der japanischen Raumfahrtbehörde Jaxa, erstmals zwei Sonnensegel im Weltraum zu entfalten, ein kleeblatt- und ein fächerförmiges. Sie waren zehn Meter breit und nur ein Zehntel so dick wie ein Blatt Papier.

Zwar dauerte der Segeltörn nur rund eine Minute: Mit dem Auftakeln war die Mission auch schon erfüllt, und die Rakete stürzte planmäßig ins Meer. Dennoch schrieben die Faltkünstler aus dem Reich der aufgehenden Sonne Weltraumgeschichte. Noch in diesem Jahr wollen sie testen, ob sich ein Gleiter mit derart filigranen Flügeln auch tatsächlich im Sonnenwind fortbewegt.

MARK MOFFETT

Stielaugen lügen nicht

Übertriebene männliche Ornamente wie der Pfauenschwanz sollten eigentlich im Zuge der Evolution ausgemerzt werden, weil sie ihre Träger benachteiligen. Schon Darwin erklärte ihre Existenz mit einer »sexuellen Selektion«: Weibchen ziehen Bewerber mit großem Handikap vor, weil diese offenbar vital genug sind, sich die hinderliche Zierde leisten zu können. Doch bei den Stielaugenfliegen scheint der Grund tiefer zu liegen. Wie Gerald Wilkinson von der Universität von Maryland schon vor längerem entdeckte, produzieren Männchen mit kurzen Augenstielen bei der Paarung überwiegend weiblichen Nachwuchs. Wie sich kürzlich zeigte, tragen sie auf ihrem X-Geschlechtschromosom ein »selbstsüchtiges« Gen, das durch Manipulation des Geschlechts der Nachkommen seine maximale Ausbreitung sichert. Es befindet sich neben der Erbanlage für die kurzen Augenstiele und wird daher mit ihr zusammen vererbt. Indem Weibchen Bewerber mit diesem Merkmal ablehnen, vermeiden sie also das betrügerische Gen. Ihre Vorliebe für Männchen mit langen Augenstielen hat mithin weder ästhetische Gründe, noch würdigt es einen Beleg für überragende Fitness. Es ist schlicht ein – per Selektion entstandener – Abwehrmechanismus gegen das falsche Spiel eines eigennützigen Gens.

ARCHÄOLOGIE

Neandertaler verspeisten Höhlenlöwen

Die genaue Datierung des Skeletts eines in Südbayern gefundenen Höhlenlöwen und die Analyse von Schnittspuren an seinen Knochen beweisen, dass Neandertaler das Raubtier einst ausweideten. An seinem Fell hatten sie dagegen kein Interesse.

Von Wilfried Rosendahl

Siegsdorf ist eine kleine Gemeinde, die ungefähr zehn Kilometer südlich des Chiemsees liegt. Unter Paläontologen hat sie als Fundstelle von Knochenresten eiszeitlicher Tiere Berühmtheit erlangt. In Schichten, die ein Bachlauf durchschneidet, fanden zwei Schüler 1975 zufällig Knochen eines Mammuts. Zehn Jahre später förderten systematische Grabungen zahlreiche Überreste ausgestorbener eiszeitlicher Säuger zu Tage. Dazu zählten außer dem Mammut, von dem ein fast vollständiges Skelett aus dem Boden geholt wurde, unter anderem auch Höhlenlöwe, Wollhaarnashorn und Riesenhirsch.

Alle Funde waren in schwarzgrauen Tonen eingebettet, den Sedimenten eines ehemaligen Wasserlochs. Es gibt keinen Hinweis, dass die Knochen nach der Ablagerung noch durcheinander geraten sind. Deshalb sollten sie ihre ursprüngliche Position beibehalten haben und alle aus demselben Zeitbereich stammen.

Menschenknochen fanden sich bisher zwar ebenso wenig wie Steinwerkzeuge. Aber schon 1992 entdeckte Carin Gross von der Universität München am Skelett des Höhlenlöwen das Signet unserer Spezies. Auf der Innenseite einiger Rippen, auf dem Beckenknochen und an den beiden Oberschenkelknochen stieß die Archäologin auf verräterische Schnittspuren. Vergleiche mit Schlachtabfällen aus der Jungsteinzeit und genaue Inspektionen unter dem Rasterelektronenmikroskop bewiesen, dass sie von Menschenhand stammen. Damit erhob sich die spannende Frage, wann welcher Frühmensch mit welcher Absicht dem gefährlichen Raubtier zu Leibe gerückt war.

Unsicherheiten der Datierung

Dazu galt es zunächst, das genaue Alter der Funde von Siegsdorf zu bestimmen. Die Gegenwart eines Riesenhirsches sowie einer Schnecke der Art *Arianta arbustorum* ließ zwar darauf schließen, dass die Tiere in einem milderen Stadium innerhalb einer Kaltzeit gelebt hatten. Doch welche das war, blieb offen. Der Stuttgarter Paläontologe Reinhard Ziegler sprach sich 1994 für die vorletzte Kaltzeit (Riss) aus, die ungefähr 190000 bis 125000 Jahre zurückliegt. Das Mammutskelett von Siegsdorf weist nämlich die beachtliche Schulterhöhe von 3,60 Metern auf und wäre für die letzte Kaltzeit (Würm) somit ein ungewöhnlich großes Tier gewesen.

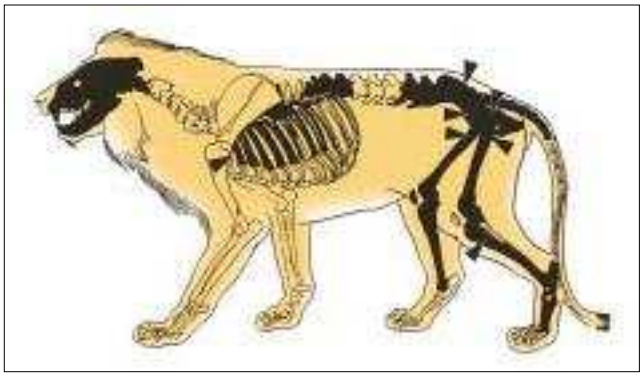
Dieser relativen Datierung widersprachen jedoch zwei absolute Alterswerte auf der Basis chemisch-physikalischer Untersuchungen. Beide erschienen freilich wenig vertrauenswürdig. Im einen Fall nannten der Finder und ein Paläontologe in einem Katalogbeitrag schlicht eine Zahl von 38500 Jahren, sagten aber nichts darüber, wer die Datierung mit welcher Methode an welchem Material vorgenommen hatte. Im anderen Fall bestanden Zweifel, ob die Altersbestimmung, die einen Wert von 47800 Jahren ergab, wirklich an einem Objekt aus Siegsdorf durchgeführt worden war. Der datierte Milchzahn eines Mammutjungen taucht jedenfalls in keinem Fundinventar auf und gehört sicher nicht zu dem erwachsenen Tier, dessen fast komplettes Skelett ausgegraben wurde.

Angesichts dieser Unsicherheiten begann ich kürzlich gemeinsam mit Robert Darga, dem Hüter der Knochen von Siegsdorf und Leiter des dortigen Naturkunde- und Mammutmuseums, die Funde neu zu untersuchen. Als Erstes

R. DARGA, SIEGSDORF

W. ROSENDAHL

Das rekonstruierte Skelett eines Höhlenlöwen *(Panthera leo spelaea*; links) und ein Diorama, das ihn zusammen mit Mammuts im eiszeitlichen Chiemgau zeigt (rechts), sind im Naturkunde- und Mammutmusem in Siegsdorf zu bewundern.



BEIDE ABBILDUNGEN: W. ROSENDAHL

Auf der Skelettzeichnung eines Höhlenlöwen mit den in Siegsdorf gefundenen Knochen (schwarz) sind die Positionen der Schnittspuren durch Pfeile markiert. Wie eine Nahaufnahme der Oberfläche des Oberschenkelknochens zeigt, können die schmalen Kerben nicht von Tierzähnen stammen, sondern müssen von Steinklingen herrühren.

sägten wir aus den Skeletten von Mammut und Höhlenlöwe Stücke von je etwa einem Gramm und ließen sie vom Leibniz-Labor in Kiel mit der Radiokarbon-Methode datieren.

Für den Höhlenlöwen lieferte die Analyse ein Alter von 47 700 und für das Mammut eines von 46 300 Jahren. Der Unterschied zwischen beiden Werten liegt innerhalb der Fehlergrenzen, sodass die zwei Tiere als etwa gleich alt gelten können. Mit den neuen Datierungen steht nun also fest, dass die Funde von Siegsdorf im Alter übereinstimmen und aus der mittleren Phase der letzten Kaltzeit stammen.

Zudem lässt sich nun auch erstmals sicher sagen, welche eiszeitliche Menschenform die Schnittspuren am Löwenskelett hinterlassen hat. In Frage kommt nur der klassische Neandertaler, da er die einzige Art der Gattung *Homo* war, die vor etwa 47 000 Jahren in Europa lebte. Damit ist zugleich erstmals die Anwesenheit dieses Frühmenschen im oberbayerischen Alpenvorland belegt.

Mit Haut und Haar?

Welches Drama aber spielte sich zwischen den Neandertalern und dem Höhlenlöwen ab? Haben die Frühmenschen das Raubtier, ein großes altes Männchen, selbst am Wasserloch erlegt, oder sind sie dort nur zufällig auf den frischen Kadaver gestoßen, bevor Hyänen oder andere Aasfresser ihn entdeckt hatten? Auf diese spannende Frage geben die Funde leider keine Antwort. Fest steht aber, dass die Neandertaler sich an dem toten Körper zu schaffen machten.

Aus heutiger Sicht sollte man erwarten, dass die Frühmenschen dem Löwen das Fell über die Ohren zogen, um sich selbst damit zu schmücken. Doch das war offenbar nicht der Fall. Wie die Schnittspuren an der Innenseite einiger Rippen und der Beckenknochen deutlich machen, wurde der Kadaver vielmehr zumindest teilweise entfleischt oder ausgeweidet.

Dagegen sieht es nicht so aus, als ob das Tier auch sein Fell hergeben musste. Knochen wie die von Zehen und Fingern, die üblicherweise beim abgezogenen Fell verbleiben, sind nämlich noch vorhanden. Auch fehlen Schnittspuren, wie sie beim Enthäuten zu erwarten wären – zum Beispiel an der Außenseite der Rippen.

Ob die Neandertaler den Löwen ganz oder nur teilweise verzehrten, lässt sich gleichfalls nicht sagen. Sicher ist nur, dass sie mit ihren Steinwerkzeugen mindestens ein ordentliches Stück Fleisch herausgeschnitten haben. Danach muss der Kadaver sehr schnell im tonigen Schlamm des Wasserlochs versunken sein. Nur so lässt sich erklären, warum das Skeletts noch so gut erhalten ist und keine tierischen Fraßspuren aufweist. Hätten die Knochen länger an der Oberfläche gelegen, wären sie früher oder später von Hyänen zerbissen worden und nicht als Zeugen für die Anwesenheit des Neandertalers am Chiemsee erhalten geblieben. ◁

Wilfried Rosendahl ist promovierter Geoarchäologe und Kurator an den Reiss-Engelhorn-Museen in Mannheim. Zudem wirkt er an verschiedenen Forschungsprojekten zum Thema »Mensch, Klima und Umwelt im Eiszeitalter« mit.

ANZEIGE

INFORMATIK

Dunkle Energie bremst Computer aus

Nach Berechnungen zweier US-Forscher setzt die beschleunigte Expansion des Universums dem Fortschritt der Computertechnik eine ultimative Grenze.

Von Stefan Maier

Wäre es im Prinzip möglich, einen unendlich leistungsfähigen Computer zu bauen? Die Frage mag akademisch klingen, hat aber schon einige der klügsten Köpfe beschäftigt. Die Antworten fallen unterschiedlich aus, je nachdem, ob sie von Wissenschaftlern stammen, die sich mit den kleinsten Dingen der Welt beschäftigen, oder von solchen, die in kosmischen Maßstäben denken.

Informatiker gehen davon aus, dass ein Computer umso leistungsfähiger ist, je kleiner seine elektronischen Schaltkreise sind. Diese Miniaturisierung stößt jedoch an Grenzen – spätestens zu dem Zeitpunkt, an dem die Hardware-Entwickler bei einzelnen Elektronen als Informationsträgern angelangt sind. Allerdings lässt sich auch dann die Rechenleistung noch steigern, wenn man zu anderen Konzepten der Datenverarbeitung übergeht und etwa Quanteneffekte ausnutzt. Gelänge es damit, Moores berühmtes Gesetz aus Jahre 1965, wonach sich die Leistungsfähigkeit eines Chips alle 18 Monate verdoppelt, für unbestimmte Zeit aufrechtzuerhalten? Klammert man sich an die (sub)mikroskopische Sichtweise, bleibt die Antwort unklar (Spektrum der Wissenschaft 11/2000, S. 24).

Der allumfassende Blick der Kosmologen dringt dagegen tiefer. Vor ihm erscheinen die Details der praktischen Realisierbarkeit irrelevant. Nur die grundlegenden physikalischen Gesetze zählen. Zum Beispiel ist eines gewiss: Alle Rechenoperationen verbrauchen Energie. Wenn also ein Computer unendlich leistungsfähig sein soll, dann muss er über eine unbeschränkte Energiequelle verfügen. Für die Kosmologen lautet die entscheidende Frage also, ob die Energie, die wir dem gesamten Kosmos entnehmen können, begrenzt ist.

Galgenfrist von 600 Jahren

Lawrence Krauss und Glenn Starkman von der Case-Western-Reserve-Universität in Cleveland (Ohio) glauben, darauf nun die Anwort gefunden zu haben. Nach den Ergebnissen ihrer Berechnungen, die als Vorabdruck im Internet einzusehen sind (www.arxiv.org/abs/astro-ph/0404510), stehen für künftige Rechenoperationen nur etwa 10^{120} Bits zur Verfügung. Demnach besäße Moores Gesetz höchstens noch rund 600 Jahre Gültigkeit; dann wäre Schluss mit der exponentiellen Steigerung der Rechengeschwindigkeit.

Dabei kommt es nicht darauf an, ob der Kosmos endlich oder unendlich ist. Die Ursache des finalen Informatik-GAUs liegt vielmehr in der Art, wie sich das Universum ausdehnt. Geschähe dies nach dem klassischen Modell, bei dem die Gravitation die Fluchtbewegung der Galaxien allmählich bremst, hätten die Computerhersteller nichts zu befürchten. Untersuchungen weit entfernter Sternsysteme in den letzten Jahren haben jedoch ergeben, dass sich die Ausdehnung des Kosmos beschleunigt. Eine mysteriöse »Antigravitation« scheint die Galaxien immer schneller auseinander zu treiben. Kosmologen vermuten dahinter eine so genannte Dunkle Energie, die schon in der ursprünglichen Fassung von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie als kosmologische Konstante vorkam.

Krauss und Starkman behaupten nun, dass es diese beschleunigte Ausdehnung ist, die dem Fortschritt der Computertechnik Grenzen setzt. Bei ihrer Argumentation stützen sie sich auf frühere Untersuchungen, die der Frage galten, wie lange intelligente Wesen im All überleben können (Spektrum der Wissenschaft 1/2000, S. 52). Schon damals kamen die beiden Forscher zu dem Schluss, dass solche Organismen wegen der beschleunigten Expansion des Universums irgendwann nicht mehr in der Lage sind, ihre Denkprozesse aufrechtzuerhalten.

Ihre Argumentation fußt auf einer einfachen Feststellung: Fremde Galaxien entfernen sich wegen der Expansion des Alls umso schneller von uns, je größer ihr Abstand zu uns ist. Ab einer bestimmten Distanz bewegen sie sich daher mit Lichtgeschwindigkeit oder schneller von uns weg. Raumbereiche jenseits dieses so genannten Ereignishorizonts sind für uns nicht zugänglich, weil Energie – und folglich auch Information – nicht schneller als mit Lichtgeschwindigkeit übertragen werden kann. Einem intelligenten Wesen stehen damit ebenso wie einem Computer nur die Ressourcen eines beschränkten Raumbereichs innerhalb des Ereignishorizonts zur Verfügung.

Dieser Raumbereich dehnt sich allerdings mit Lichtgeschwindigkeit aus. Im klassischen Modell, in dem sich die Expansion des Kosmos allmählich verlangsamt, bedeutet das, dass mit der Zeit immer fernere Galaxien für uns sichtbar

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Bei beschleunigter Expansion dehnt sich der Kosmos schneller aus als der Ereignishorizont. Dadurch werden immer weniger Galaxien für uns zugänglich oder überhaupt nur sichtbar.

und zugänglich werden, weil der Ereignishorizont sie auf ihrer Flucht gewissermaßen überholt. Bei beschleunigter Expansion geschieht jedoch das Gegenteil: Immer mehr ferne Galaxien werden so schnell, dass sie ihrerseits den Ereignishorizont überholen und dahinter verschwinden (Bild).

Roboter durchkämmen das All

In dem Gedankenexperiment von Krauss und Starkman schwärmen zahllose winzig kleine Roboter von der Erde in den Weltraum aus und verwandeln dort die Restmasse von Himmelskörpern gemäß Einsteins berühmter Formel in Energie. Diese strahlen sie dann zur Erde zurück, um einen Supercomputer zu speisen. Dabei erreichen die Maschinen natürlich nur Materie innerhalb des Ereignishorizonts. Wenn deren Menge konstant bleibt oder – wie beim Modell der beschleunigten Expansion – sogar abnimmt, ist die gesamte in der Zukunft zur Verfügung stehende Energie begrenzt oder rückläufig.

Damit kann ein künftiger Computer nur auf ein endliches Energiereservoir zurückgreifen. Das heißt allerdings noch nicht unbedingt, dass seine Kapazität begrenzt ist. Die für eine Rechenoperation benötigte Energie verringert sich nämlich, wenn die Temperatur des Computers sinkt. Zwar kann der Rechner nicht kälter werden als das Universum insgesamt, weil aktive Kühlung wegen des Energieverbrauchs nicht in Frage kommt. Die Temperatur des Weltalls, die von der kosmischen Hintergrundstrahlung bestimmt wird, nimmt aber wegen der Expansion des Kosmos stetig ab. Damit wären im Prinzip immer kältere Computer denkbar, die immer weniger Energie verbrauchen und folglich trotz begrenzter Energiezufuhr immer mehr Rechnungen durchführen könnten.

Doch auch dieser Ausweg ist laut Krauss und Starkman versperrt. Die Existenz eines Ereignishorizonts bedingt nämlich, dass so genannte Hawking-Strahlung auftritt. Diese entspricht ebenfalls einer Temperatur, die kein Computer unterschreiten kann.

Wie der Astrophysiker Stephen Hawking vor fast dreißig Jahren erkannte, senden Schwarze Löcher Strahlung aus und »verdampfen« dadurch allmählich. Der Grund dafür ist der Ereignishorizont. Der Quantentheorie zufolge bilden sich im Raum unablässig virtuelle Teilchenpaare, die sich nach einiger Zeit wieder gegenseitig vernichten. Wenn sie jedoch in der kurzen Spanne ihrer Existenz auf verschiedene Seiten des Ereignishorizonts geraten, entschwindet das eine für immer, während das andere übrig bleibt und zur Komponente der Hawking-Strahlung wird.

Unter Berücksichtigung dieser Restriktionen kamen Krauss und Starkman für die maximale Anzahl von Informationsbits, die in der Zukunft unseres Universums noch verarbeitet werden können, auf den oben genannten Wert von 10^{120}. Diese Zahl – eine Eins mit 120 Nullen – ist zwar riesig, aber eben doch endlich. Sie erlaubt nur noch 400 Verdopplungen der Rechenkapazität, und wenn alle 15 Monate eine solche Verdopplung stattfindet, ist nach 600 Jahren das Ende der Fahnenstange erreicht. Das gilt auch für verteilte Computersysteme, bei denen der Zentralrechner statt mit Energie mit den Ergebnissen lokaler, im Universum verteilter Prozessoren gefüttert wird.

Nun ist das Szenario von Krauss und Starkman natürlich völlig irreal. Deshalb wird das Ende von Moores Gesetz in Wahrheit schon viel früher kommen. Außerdem wäre die Menschheit wohl kaum so töricht, die gesamte Energie des Universums, sofern sie denn verfügbar ist, in den Fortschritt der Computertechnik zu stecken. Andererseits hat sich unsere Spezies bisher nicht gerade durch verantwortungsvollen Umgang mit natürlichen Ressourcen ausgezeichnet und teils bedenkenlos die Umwelt dem Moloch Technik geopfert – ohne Rücksicht darauf, dass wir uns damit auf lange Sicht die eigenen Lebensgrundlagen entziehen. Ob sich das in Zukunft ändert? ◁

Stefan Maier ist Professor für Physik an der Universität Bath (Großbritannien).

ANZEIGE

HIRNFORSCHUNG

Bin ich das?

Unsere Selbstwahrnehmung lässt sich leicht in die Irre führen. Schon ein kleines Täuschungsmanöver genügt, und man hält einen künstlichen Arm für den eigenen.

Von Frank Schubert

Haben Sie sich schon einmal Ihre Hände angeschaut und sich gefragt, ob das wirklich Ihre sind? Nein? Sie halten Zweifel daran für abwegig? Dann sollten Ihnen jüngste Versuche britischer Forscher zu denken geben. Sie belegen, dass Menschen ihre eigenen Gliedmaßen ganz leicht mit künstlichen verwechseln können: Eine bescheidene kleine List reicht aus, und schon hält das Gehirn einen Gummi-Arm für einen eigenen Körperteil – und das, obwohl die echte Extremität noch heil und in voller Größe an der Schulter sitzt *(Science, 6. 8. 2004, S. 875)*.

Forscher um Henrik H. Ehrsson vom Institut für Neurologie in London führten ihre Experimente an je neun Männern und Frauen aus. Sie ließen die Probanden auf einer Liege Platz nehmen und den rechten Arm locker ausgestreckt auf ein Stützkissen legen. Unmittelbar darüber platzierten sie eine leicht geneigte Tischplatte. Dadurch konnten die Versuchsteilnehmer ihren Arm nicht mehr sehen. Die Platte war mit demselben Material wie das Stützkissen überzogen.

Nun holten die Wissenschaftler die Gummi-Attrappe eines rechten Unterarms hervor, die dem natürlichen Vorbild täuschend ähnlich sah. Sie wurde in derselben Orientierung wie der echte Arm auf die Tischplatte gelegt. Auf ihrem hinteren Ende lag locker ein Tuch, das bis zur Schulter reichte (Bild).

Das allein genügte allerdings noch nicht, das Gehirn zum Narren zu halten; ein weiteres, subtiles Täuschungsmanöver musste hinzukommen. Dazu strich der Experimentator mit zwei Pinseln simultan über beide Arme, den falschen und den echten. Natürlich konnte die Versuchsperson nur beobachten, wie die Attrappe gestreichelt wurde – was mit der echten Extremität geschah, lag außerhalb ihres Sichtfelds. Wohl aber spürte sie die Pinselhaare auf der Haut.

Das verfehlte seine Wirkung nicht: Nach kurzer Zeit hatten die Probanden, obwohl sie es besser wussten, das unabweisliche Gefühl, der Gummi-Arm sei Teil ihres Körpers. Sie meldeten das Auftreten dieser verwirrenden Empfindung, indem sie mit dem Fuß auf einen Knopf drückten. Der falsche Eindruck war so stark, dass die Versuchsteilnehmer sogar spontan zur Attrappe wiesen, wenn die Forscher sie aufforderten, mit der freien Hand auf den eigenen Arm zu deuten.

Wie kommt es zu dieser erstaunlichen Sinnestäuschung? Um das herauszufinden, beobachteten Ehrsson und seine Kollegen während des Experiments zugleich die Gehirne der Probanden, indem sie die Liege in die Röhre eines Magnetresonanztomografen schoben. Dabei zeigte sich, dass mit dem Einsetzen der trügerischen Empfindung die Hirnaktivität im so genannten prämotorischen Kortex, einer Region im vorderen Bereich der Großhirnrinde, stark anstieg.

Die echte Hand liegt verborgen unter einer Attrappe, während die Gehirnaktivität der Versuchsperson im Magnetresonanztomografen gemessen wird.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Offenbar spielt diese Region eine Schlüsselrolle bei der physischen Selbstwahrnehmung. Dafür spricht nach Ansicht der Wissenschaftler auch, dass der prämotorische Kortex sowohl mit Hirnbereichen verbunden ist, die visuelle Informationen verarbeiten, als auch mit solchen, die auf Berührungsreize ansprechen. Demnach scheint er die Daten mehrerer Sinne zusammenzusetzen. In dem beschriebenen Versuch erwuchs so aus der Verbindung von visueller und taktiler Information der fälschliche Gesamteindruck »Das ist meine Hand«.

Irrtum trotz Absicherung

Zu dieser Deutung passt, dass die Aktivität im prämotorischen Kortex umso höher war, je intensiver die Sinnestäuschung bei den Versuchsteilnehmern ausfiel. Wenn die Forscher den Gummi-Arm schief auf die Tischplatte legten oder die Pinsel nicht exakt synchron bewegten, waren Fehlempfindung und Aktivitätszunahme in der betreffenden Hirnregion nur schwach ausgeprägt.

Die neuen Erkenntnisse darüber, wie leicht das Gehirn sich bei der Selbstwahrnehmung übertölpeln lässt, haben durchaus auch praktische Bedeutung. Sie könnten bei der Behandlung von Patienten helfen, die Probleme mit der Unterscheidung zwischen dem eigenen Ich und der Außenwelt haben, weil sie etwa unter Schizophrenie leiden oder ihr prämotorischer Kortex durch einen Schlaganfall geschädigt wurde. Vor allem aber liefern sie neue Aufschlüsse über die Arbeitsweise des Gehirns. Demnach verlässt sich unser Denkorgan bei der Selbstwahrnehmung nicht nur auf einen einzelnen Sinn, sondern integriert vielerlei Informationen. Trotzdem ist es nicht gegen Irrtum gefeit. Wundern Sie sich also nicht, sollten Sie im dichten Einkaufsgewühl das Bein Ihres Nachbarn versehentlich für das eigene halten. ◁

Frank Schubert ist promovierter Biophysiker und Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

Der Fall Kuba

Der Inselstaat konnte sich mit Biotechnologie aus der Isolation befreien.

Gleich ob sie in Lateinamerika, Indien oder Afrika forschen: Wissenschaftler in Entwicklungsländern haben meist unter dem doppelten Handicap zu leiden, dass ihnen die harten Devisen für die Forschung fehlen und dass sie von den Strömen des Austauschs an Informationen und Fachkräften zu weit abgelegen sind. Die immer stärkere Konzentration auf Eliteeinrichtungen von Harvard bis Oxbridge verstärkt diesen Trend, während die Demokratisierung der Informationsflüsse durch das Internet nur in sehr begrenztem Umfang Abhilfe schafft.

Nirgendwo ist diese Zwickmühle aus Armut und Isolation ausgeprägter als in Kuba. Seit vier Jahrzehnten sorgt dort das anhaltende Embargo des Nachbarlands USA für eine permanente Wirtschaftskrise. Nach dem Zusammenbruch der Sowjetunion hielt sich der Karibikstaat notdürftig mit Deviseneinnahmen aus dem wachsenden Tourismusgeschäft über Wasser. Jetzt kommt überraschend eine zweite Einnahmequelle hinzu: eine florierende Biotechnologie, die unaufhaltsam in die Gewinnzone steuert. Das ist umso erstaunlicher, als die Wirtschaftsblockade durch die USA den Forschern in Castros Reich das Leben erschwert, indem sie den Kauf von wichtigen Instrumenten und den Internet-Zugang behindert. Doch die Kubaner haben es geschafft, die allzu häufige Not der Wissenschaft in der Dritten Welt in eine Tugend zu verwandeln.

In den letzten zwanzig Jahren gründete der Inselstaat in den westlichen Vororten von Havanna rund zwanzig moderne Forschungszentren für Biotechnologie. Ihr Auftrag: Ersatz zu finden für die Medikamente, die sich das Land auf dem Weltmarkt nicht leisten kann – zum Beispiel den Impfstoff gegen *Haemophilus influenzae* B, einen Erreger der Hirnhautentzündung. Seit den 1980er Jahren gibt es eine Vakzine, die in den Industrienationen flächendeckend eingesetzt wird, für die Entwicklungsländer jedoch zu teuer ist. Kubanischen Forschern gelang es, einen simpleren, vollsynthetischen Ersatz zu entwickeln, der nur ein Zehntel bis ein Hunderstel so viel kostet *(Science, 23.7.2004, S. 522)*. Als Erster seiner Art hat er alle klinischen Tests bestanden und wird bereits im Großmaßstab auf der Karibikinsel hergestellt. Die weltweite Nachfrage dürfte bei 500 Millionen Dosen pro Jahr liegen. Damit verfügt Kuba über seinen ersten Blockbuster.

Hier offenbart sich der paradoxe Standortvorteil einer hoch entwickelten Biotechnologie in einem armen Land mit tropischem Klima. Die dringendsten Probleme der Kubaner – Bekämpfung von Infektionskrankheiten mit minimalem finanziellen Aufwand – sind dieselben wie bei über fünf Milliarden Menschen in Afrika, Lateinamerika und Asien. Wenn Kuba für den Eigenbedarf einen neuen Impfstoff entwickelt, erhält es gleichzeitig ein Exportgut, mit dem es seine Handelsbilanz aufbessern kann.

Die Erfolgsgeschichte endet aber nicht bei den Impfstoffen. Die Kubaner exportieren inzwischen auch monoklonale Antikörper und andere Pharmaproteine. Damit helfen sie nicht nur Ländern der Dritten Welt, akute Gesundheitsprobleme in finanzierbarer Weise zu lösen, sondern führen zugleich vor, dass sich auch ein armes Land bisweilen an den eigenen Haaren aus dem Sumpf ziehen kann.

Die Pharmariesen in den Industrienationen wären durchaus an einer Kooperation mit den kubanischen Biotech-Firmen interessiert. Den meisten stehen jedoch US-Gesetze im Wege, die jede Wirtschaftskooperation verbieten. So schadet die Großmacht mit ihrer Strafmaßnahme ihren eigenen Interessen. Da die Embargo-Politik ihr erklärtes Ziel – den Sturz der Castro-Regierung – in über vierzig Jahren nicht erreicht hat, bleibt die Hoffnung, dass wenigstens der nächste US-Präsident ihre Sinnlosigkeit erkennt.

Michael Groß

www.michaelgross.co.uk

ANZEIGE

GENETIK

DNA-Baugerüst mit Einfädelhelfer

Bei der Vervielfältigung der Erbsubstanz dient ein Eiweißring als Gerüst. Um das DNA-Molekül hindurchzufädeln, ist eine molekulare Maschine erforderlich, deren Struktur jetzt aufgeklärt wurde.

Von Michael Groß

Als James D. Watson und Francis H. C. Crick vor gut einem halben Jahrhundert die Doppelhelix-Struktur der DNA beschrieben, merkten sie am Schluss ihres Berichts an, dass aus der reißverschlussartigen Anordnung der Basen unmittelbar ein Kopiermechanismus für das Erbmaterial folge. Was ihnen vorschwebte und sich später im Prinzip bestätigte, ist tatsächlich ein sehr einfacher Vorgang: Der DNA-Reißverschluss wird aufgetrennt, und jede Seite dient als Vorlage (Matrize) für die Produktion eines neuen Gegenstücks.

Der Teufel steckt jedoch wie so oft auch hier im Detail. Zwar funktioniert dieser simple Mechanismus im Reagenzglas hervorragend – etwa bei der Polymerasekettenreaktion zur Vervielfältigung von Erbmaterial. In der Zelle ergeben sich aber jede Menge Komplikationen. Ein wesentliches Problem liegt darin, dass der DNA-Faden, der aus Platzgründen normalerweise hochgradig verknäuelt ist, erst einmal gestreckt werden muss, bevor sich die beiden Stränge trennen und kopieren lassen. Zum Aufdröseln braucht es mehrere Enzyme, die notfalls auch mal einen Strang aufschneiden und dann wieder zusammenfügen. Manche Forscher halten all das für zu kompliziert. Sie wenden sich deshalb von der klassischen Doppelhelix ab und sinnen über einfacher zu öffnende Reißverschlussmodelle nach.

Weitere Verwicklungen resultieren daraus, dass die DNA eine chemisch festgelegte Leserichtung hat, welche auch die Arbeitsrichtung der Enzyme bestimmt. Sie ist in den beiden Strängen aber entgegengesetzt – wie die Fahrtrichtung auf der linken und rechten Seite einer Straße. Stellen Sie sich vor, der Asphalt soll erneuert werden, aber die Maschinen dürfen immer nur in dem kurzen Abschnitt arbeiten, der gerade abgesperrt ist, und sich – dank einem tückischen neuen Zusatz zur StVO – auf den beiden Spuren jeweils ausschließlich in Fahrtrichtung bewegen. Eine Seite der Straße kann dann kontinuierlich bearbeitet werden, weil sie in die Richtung weist, in die sich auch die Baustelle insgesamt fortbewegt. Die Gegenspur müsste hingegen stückchenweise zusammengestoppelt werden. So spielt sich in etwa die Verdoppelung des Erbmaterials in der Zelle ab. Der eine Strang wird in einem Rutsch kopiert, der andere aus kleinen Stücken zusammengesetzt, den so genannten Okazaki-Fragmenten.

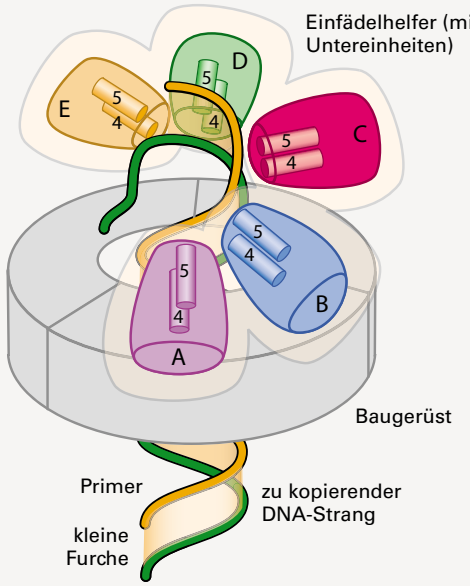
Bei all diesen Schnipseleien muss die Zelle Vorkehrungen treffen, dass sich die diversen Maschinen der DNA-Baustelle nicht verlieren. Wie man erst in den 1990er Jahren erkannte, dient zu diesem Zweck ein universell vorhandenes Protein. Es legt sich an der zu bearbeitenden Stelle wie ein Ring um jeden der beiden DNA-Stränge, die (als »Negativ«) kopiert werden sollen. Dadurch hält es die Baumaschine, die jeweils das neue Gegenstück zusammensetzt, bei der Stange – genauer: beim Matrizen-Strang. Auf der Seite, die in einem Rutsch bearbeitet wird, ist das die einzige Funktion des Rings. Auf der Gegenspur dient er dagegen zusätzlich als Baugerüst für die Enzyme, welche die Okazaki-Fragmente miteinander verknüpfen.

Vorgang auf halbem Weg gestoppt

Nun bringt die Topologie des Rings allerdings gleich die nächste Schwierigkeit mit sich: Der DNA-Strang muss hindurchgefädelt werden. Dafür ist ein weiteres Protein zuständig. Wie es seine Aufgabe erledigt, lag bisher im Dunkeln. Jetzt aber konnten gleich zwei Arbeitsgruppen interessante Einblicke gewinnen.

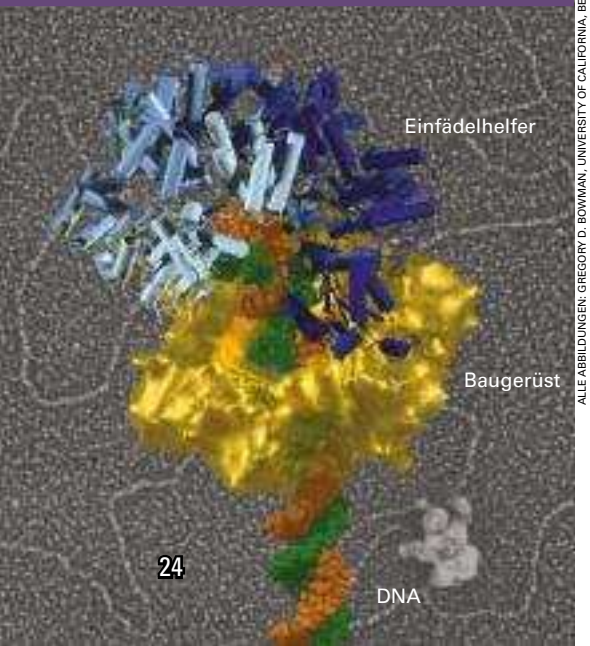
Den Forschern in Japan und Kalifornien gelang es, auf verschiedenen Wegen Bilder des Rings samt Helferprotein und eingefädelter DNA zu erhalten. Obwohl sie mit völlig anderen Organismen arbei-

DNA-Baustelle im Detail



Die fünf Untereinheiten des Einfädelhelfers (A–E) liegen hufeisenförmig auf dem Baugerüst. Der zu kopierende DNA-Strang hat sich mit einem kurzen DNA-Stück – dem »Primer« – zu einem doppelhelikalen Abschnitt gepaart, der als Startstück für die Replikation dient. An dessen kleine Furche schmiegen sich die Untereinheiten des Einfädelhelfers mit den nach innen weisenden Enden der Helices 4 und 5 (als Zylinder dargestellt).

Bild der Baustelle



ALLE ABBILDUNGEN: GREGORY D. BOWMAN, UNIVERSITY OF CALIFORNIA, BERKELEY

In annähernd atomarer Auflösung konnten Forscher den Komplex aus DNA, Baugerüst und Einfädelhelfer elektronenmikroskopisch abbilden. Die Komponenten sind hier künstlich eingefärbt.

teten, zeigen ihre Schnappschüsse ziemlich ähnliche Strukturen. Das macht deutlich, dass es sich um einen fundamentalen Prozess handelt, an dem im Verlauf der Evolution nicht mehr ernsthaft gerüttelt wurde.

Das Team von Kosuke Morikawa in Osaka untersuchte die DNA-Baustelle der Hitze liebenden Mikrobe *Pyrococcus furiosus*, die zum Urreich der Archaea gehört. Dabei nutzte es die Tatsache, dass in der letzten Phase des Einfädelvorgangs der Energieträger ATP verbraucht wird. Indem die Japaner eine nicht abbaubare Variante des ATP-Moleküls einsetzten, gelang es ihnen, den Vorgang auf halbem Weg zu stoppen. So erhielten sie einen Verbund aus allen Beteiligten: der zu kopierenden DNA, dem darumgelegten Ring (den man in Unkenntnis seiner genauen Funktion auf den grässlichen Namen PCNA – Proliferating Cell Nuclear Antigen – getauft hat) und dem Einfädelhelfer (RFC für Replication Factor C).

Das Molekülungetüm war insgesamt zu sperrig, um sich kristallisieren zu lassen – Voraussetzung für eine hoch aufgelöste Röntgenstrukturanalyse. Deshalb bildeten es die Forscher elektronenmikroskopisch ab. Die Auflösung dieses Verfahrens reicht zwar nicht ganz, einzelne Atome sichtbar zu machen. Dennoch war das gewonnene Bild so detailliert und scharf, dass sich die einzelnen Proteinbausteine, deren atomare Struktur zuvor schon per Röntgenbeugung ermittelt worden war, nachträglich einpassen ließen *(Nature Structural Molecular Biology, Bd. 11, S. 632)*.

John Kuryan und seine Mitarbeiter in Berkeley arbeiteten mit der Bierhefe, die wie Pflanzen und Tiere zu den höheren Organismen mit echtem Zellkern (Eukaryoten) gehört. Zudem beschränkten sie sich auf den Verbund aus Ring und Einfädelhelfer, da dieser sich kristallisieren ließ. Nachdem sie die genaue Anordnung der Atome darin per Röntgenstrukturanalyse ermittelt hatten, bedienten sie sich des Computer Modelling, um die fehlende DNA einzupassen *(Nature, Bd. 429, S. 724)*.

Vom Standbild zum kompletten Film

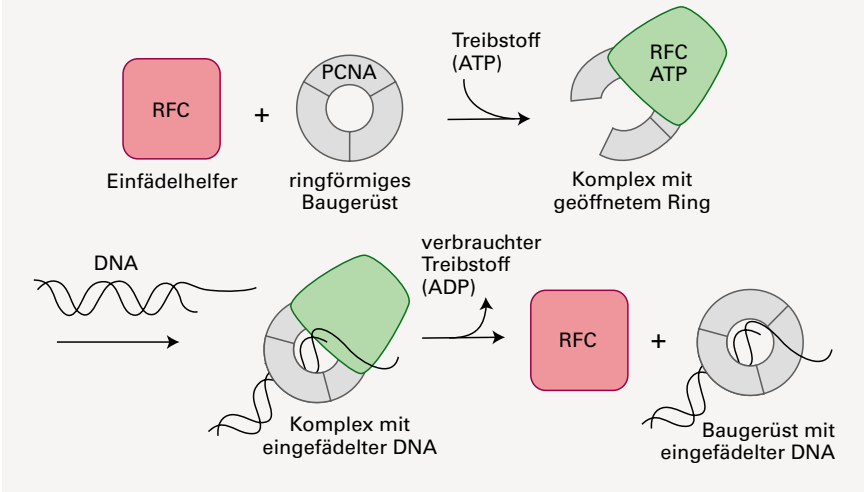
Beide Arbeitsgruppen erhielten Bilder, in denen das Helferprotein RFC wie ein Hufeisen auf dem geschlossenen Ring liegt. Schraubenartige Windungen in der Innenseite des RFC dienen offenbar dazu, die kopierbereite DNA zu erkennen und aufzunehmen.

Die jetzt vorliegenden Standbilder erlauben es zwar noch nicht, den genauen Ablauf der Handlung zu verfolgen. Die Forscher vermuten allerdings, dass die zu kopierende DNA sich zunächst selbsttätig von ihrem Gegenstrang löst und stattdessen ein kurzes Anfangsstück der neu herzustellenden Basenfolge anlagert – einen so genannten Primer, wie er auch in der Polymerasekettenreaktion benötigt wird, da DNA-Polymerasen grundsätzlich nicht bei null anfangen können. An dieser Struktur mit dem charakteristischen Übergang zwischen Einzel- und Doppelstrang dürfte das mit dem Ring verbundene Helferprotein erkennen, dass hier eine DNA-Baustelle eröffnet werden soll. ▷

ANZEIGE

So wird der zu kopierende DNA-Strang samt Primer in das ringförmige Baugerüst (PCNA) eingefädelt. Durch Anlagerung des Einfädelhelfers (RFC) und Hinzutritt des Energieträgers ATP öffnet sich der Ring. Der DNA-Strang kann hineinschlüpfen. Dann schließt sich der Ring wieder, und der Einfädelhelfer löst sich ab, während das ATP zu ADP gespalten wird.

Das Einfädeln der DNA



ANZEIGE

▷ Daraufhin biegt es den Ring ein wenig auf und bugsiert den DNA-Faden durch die Öffnung ins Innere. Dabei spaltet es das gebundene ATP und büßt damit seine Bindungsfähigkeit ein. Nachdem es sich vom Ring gelöst hat, schließt sich dieser wieder. Den Platz des Helferproteins nimmt nun die DNA-Polymerase ein, welche die Synthese des neuen DNA-Strangs beginnt.

Um diesen Handlungsablauf beweisen und mit zusätzlichen Details anreichern zu können, müsste man weitere Schnappschüsse davon anfertigen. Dazu bräuchte man einen Trick, mit dem es gelänge, den Einfädelmechanismus in einem früheren Stadium anzuhalten – am besten während der Ringöffnung. Die Findigkeit der Molekularbiologen ist also gefragt. Von ihr hängt es ab, ob und wann die Vorgänge beim Einrichten der DNA-Baustelle komplett aufgeklärt werden. ◁

Michael Groß ist Biochemiker, freier Wissenschaftsjournalist und »Science Writer in Residence« am Birkbeck College in London.

GENTECHNIK

Schutzimpfung für Pflanzen

Trotz massivem Einsatz von Spritzmitteln verursachen Pilzkrankheiten bei Nutzpflanzen hohe Ernteverluste und Qualitätseinbußen. Abhilfe verspricht die Übertragung von Genen für Antikörper, die pilzzerstörende Proteine gezielt zu den Schädlingen lotsen.

Von Petra Jacoby

Ein milder Winter, gefolgt von feuchtwarmer Witterung im Frühsommer, lässt Pilze sprießen. Deshalb litten Getreide, Raps und Gemüsepflanzen in der diesjährigen Anbausaison besonders stark unter Mykosen. Um Schäden einzudämmen, greifen die meisten Landwirte noch immer zur chemischen Keule: Alljährlich werden in Deutschland im Durchschnitt 300 Gramm Fungizide pro Hektar Ackerfläche ausgebracht. Aber die schweren Geschütze sind nicht nur ökologisch heikel, sondern wirken auch nicht bei allen Erregern zufrieden stellend.

Zu den Problemkeimen gehören Pilze der Gattung *Fusarium*. Sie führen bei Getreide zu Ährenerkrankungen, die den Ertrag stark mindern und die Kornqualität erheblich beeinträchtigen (Bild). Hinzu kommt, dass *Fusarium*-Pilze gesundheitsgefährdende Giftstoffe absondern: so genannte Mykotoxine. Diese gelangen mit dem Mehl in die Nahrung und können verschiedenste Krankheiten

BEIDE FOTOS: HEINRICH GRAUSGRUBER, UNIVERSITÄT FÜR BODENKULTUR, WIEN

Pilze der Gattung *Fusarium* lassen die Ähren von Getreidepflanzen ausbleichen (oben). Auch die Körner sind entfärbt und verkümmert (rechts). Zudem enthalten sie giftige Mykotoxine.

wie Leberschäden und sogar Krebs hervorrufen. Bislang ist noch kein Fungizid auf dem Markt, das gegen *Fusarium*-Pilze hinreichend wirkt. Neue Strategien im Kampf gegen diese Krankheitserreger sind daher gefragt.

Rainer Fischer und seine Kollegen an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule und am Fraunhofer Institut für Molekularbiologie und Angewandte Ökologie in Aachen haben nun eine viel versprechende gentechnische Abwehrmethode entwickelt. Dabei werden die Pflanzen gentechnisch so verändert, dass sie speziell bewaffnete Antikörper gegen *Fusarium* herstellen und den Pilz auf diese Weise in Schach halten *(Nature Biotechnology, Bd. 22, S. 732)*.

Antikörper (Immunglobuline) sind eine Erfindung der Wirbeltiere – Pflanzen können sie nicht auf natürlichem Weg bilden. Deshalb mussten die Wissenschaftler ein Huhn mit heranziehen. Sie impften es mit einem Molekül aus der Zellwand von *Fusarium* und extrahierten den dagegen gebildeten Antikörper. Der allein genügte allerdings noch nicht als Abwehrwaffe.

Kombiwaffe mit Zielsucher

Das Immunglobulin aus dem Huhn war nämlich nur in der Lage, sich gezielt an die Zelloberfläche des Pilzes zu heften, fügte ihm aber keinen größeren Schaden zu. Deshalb koppelten es die Wissenschaftler mit pilzzerstörenden Eiweißstoffen, so genannten antimikrobiellen Peptiden. Damit erhielten sie ein Mischprotein, das eine schlagkräftige und treffsichere Waffe bildet: Die Antikörperhälfte dient als Peilsystem und das antimikrobielle Peptid als Munition.

Fischer und seine Mitarbeiter erzeugten dieses Kombiprodukt in drei Varianten – mit jeweils unterschiedlichen pilzzerstörenden Bestandteilen aus Weizen, Rettich und einem Schimmelpilz. Das Gen dieser antimikrobiellen Peptide verknüpften sie mit der Erbsubstanz für den Huhn-Antikörper und führten die künstliche Zwitter-DNA dann in die gut erforschte Modellpflanze *Arabidopsis thaliana* (Ackerschmalwand) ein. Als Transportvehikel diente ein *Agrobacterium*, das natürlicherweise bestimmte Pflanzen infiziert und einen Teil seiner Erbsubstanz in ihr Genom einbaut.

Die genetisch veränderten *A. thaliana* lasen die fremde Erbinformation zusammen mit ihrer eigenen ab und ▷

ANZEIGE

BEIDE ABBILDUNGEN: BARRY M. CUNFER, UNIVERSITY OF GEORGIA

Fusarium-Pilze befallen auch die Fruchtstände der Sorghum-Hirse (rechts), die zu den wichtigsten tropischen Getreidearten zählt, und lassen die Körner verschimmeln (unten).

ANZEIGE

▷ synthetisierten dann das Mischprotein aus Antikörper und antimikrobiellem Peptid. Dadurch waren sie gleichsam gegen den Pilz geimpft.

Nur leichte Erkrankung trotz tödlicher Dosis

Das bestätigten Tests, bei denen normale und transgene *Arabidopsis*-Pflanzen mit *Fusarium* infiziert wurden. Um die Resistenzbildung klarer erkennen zu können, verabreichten die Forscher eine so große Menge ansteckender Pilzsporen, dass sämtliche normalen Pflanzen schon nach zwei Wochen abstarben. Die transgenen Exemplare erkrankten dagegen nur leicht bis mäßig. Am erfolgreichsten behaupteten sich Pflanzen, bei denen das antimikrobielle Peptid aus Rettich an den Antikörper gekoppelt war. Dieser Eiweißstoff scheint – ebenso wie das Peptid aus einem Schimmelpilz – die Zellmembranen des Pilzes zu attackieren. Dagegen enthielt das dritte Mischprotein ein Enzym aus Weizen, welches das Chitingerüst von Pilzzellwänden zerschneidet.

Zwar produzieren Pflanzen auch selbst antimikrobielle Peptide. Die Untersuchungen an der Ackerschmalwand zeigen jedoch, dass die Eiweißstoffe viel besser wirken, wenn sie mit einem spezifischen Antikörper gekoppelt sind, der sie zu ihrem Angriffsziel lotst. Nutzpflanzen mit bewaffneten Antikörpern gegen Pilzinfektionen zu immunisieren ist daher ein aussichtsreicher Ansatz für die Schädlingsbekämpfung in der Landwirtschaft.

So böten transgene Getreidesorten mit eingebauter Resistenz gegen *Fusarium* endlich eine Lösung für das Problem der gefährlichen Mykotoxine im Mehl. Die Methode ließe sich aber prinzipiell auch auf andere Pilzerkrankungen von Nutzpflanzen ausdehnen. Dazu sollte es genügen, je nach gewünschter Resistenz die Erbinformation für den Antikörperanteil des immunisierenden Mischproteins auszutauschen.

Die deutsche Bevölkerung steht genetisch veränderten Nahrungsmitteln großenteils ablehnend gegenüber. Bei allen ernst zu nehmenden Bedenken bleibt jedoch festzuhalten, dass transgene Kulturpflanzen auch einen bedeutenden Beitrag zum Umweltschutz leisten können. Schließlich ließe sich, wenn Nutzpflanzen durch Fremd-Gene in ihrem Erbgut selbsttätig gegen häufige Krankheitserreger resistent wären, der ebenso umweltschädliche wie teure Einsatz von Spritzmitteln drastisch senken. ◁

Petra Jacoby ist Diplombiologin und arbeitet als freie Wissenschaftsjournalistin in Wittlich.

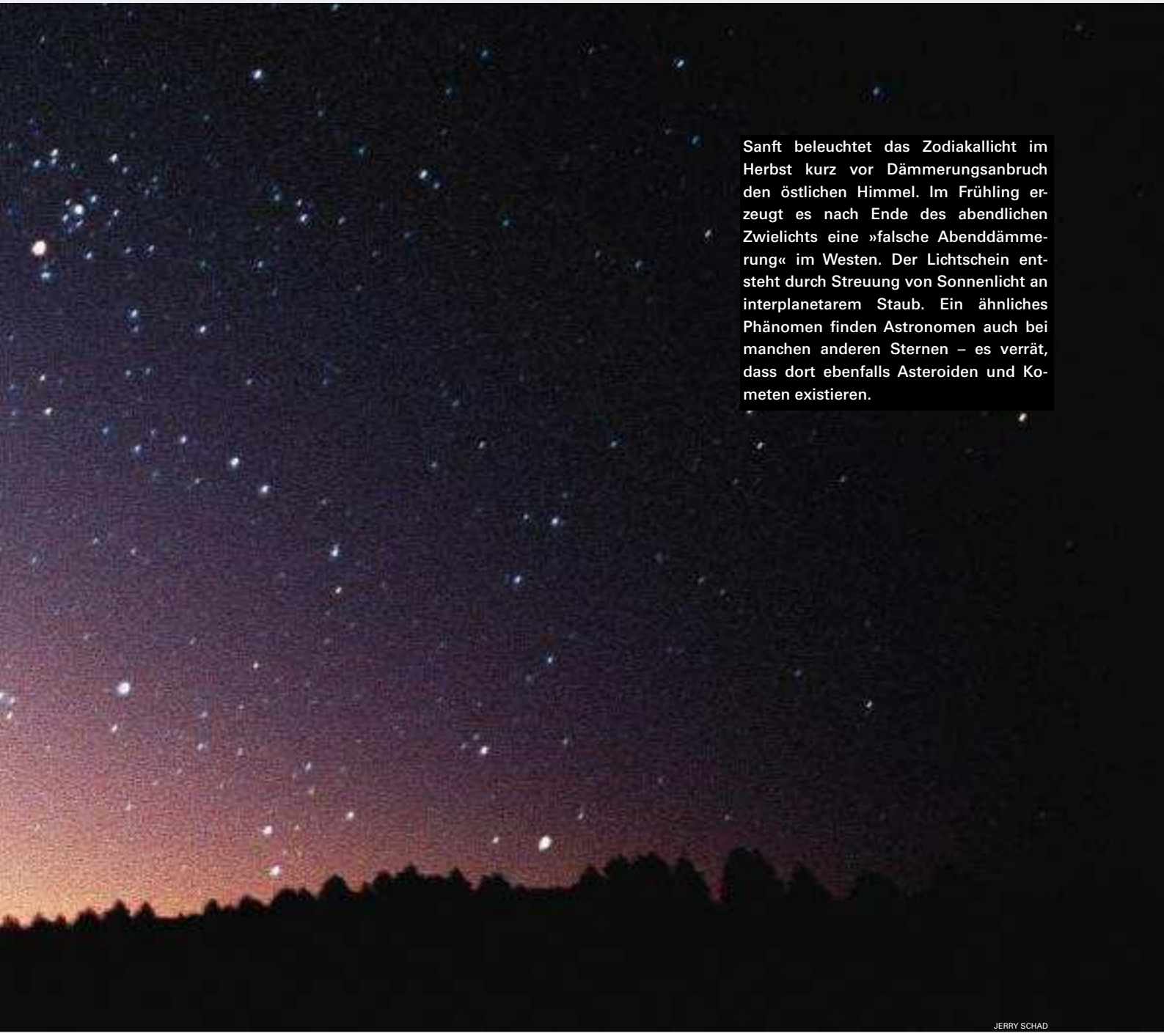
Suche nach der Nadel in stellaren Staubhaufen

Riesenplaneten zu finden, die um ferne Sonnen kreisen, ist vergleichsweise einfach. Doch um zu klären, ob fremde Planetensysteme auch kleinere Himmelskörper wie Kometen und Asteroiden enthalten, müssen Astronomen vor allem eines tun: im Staub herumstochern.

Von David R. Ardila

Eine grundlegende Frage der modernen Astronomie ist noch unbeantwortet: Stellt unsere Sonne eine Ausnahme dar – oder kreisen auch um andere Sterne im Milchstraßensystem Trabanten verschiedenster Größe? In den letzten elf Jahren spürten die Astronomen zwar rund 120 extrasolare Planeten auf, indem sie nach winzigen Torkelbewegungen sonnenähnlicher Zentralgestirne Ausschau hielten. Doch mit dieser Methode lassen sich nur massereiche Planeten entdecken, die ihren Mutterstern auf engen Bahnen umkreisen. Würden außerirdische Astronomen auf ihrer fernen Welt das Verfahren auf unser Sonnensystem anwenden, so könnten sie vielleicht den Riesenplaneten Jupiter nachweisen, möglicherweise noch Saturn. Doch all die kleineren Himmelskörper, welche die vielköpfige Schar der solaren Familie bilden, würden sie übersehen: Asteroiden, Kometen, terrestrische Planeten.

Wie können die Astronomen solche relativ kleinen Objekte aufspüren, um den generellen Aufbau von Planetensystemen zu verstehen? Einen Hinweis liefert uns der Abendhimmel, wenn wir im Frühjahr gleich nach Sonnenuntergang gen Westen schauen: Unter guten Sichtbedingungen erkennt man dann das Zodiakallicht, ein schwach schimmerndes Dreieck, das vom Horizont nach oben ragt. Das Phänomen entsteht durch Sonnenlicht, das an den Partikeln des interplanetaren Staubs in unserem Sonnensystem gestreut wird. Das schimmernde Dreieck erstreckt sich entlang der Ekliptik, also der scheinbaren Sonnenbahn



Sanft beleuchtet das Zodiakallicht im Herbst kurz vor Dämmerungsanbruch den östlichen Himmel. Im Frühling erzeugt es nach Ende des abendlichen Zwielichts eine »falsche Abenddämmerung« im Westen. Der Lichtschein entsteht durch Streuung von Sonnenlicht an interplanetarem Staub. Ein ähnliches Phänomen finden Astronomen auch bei manchen anderen Sternen – es verrät, dass dort ebenfalls Asteroiden und Kometen existieren.

JERRY SCHAD

am Firmament – ein Indiz dafür, dass der Staub scheibenförmig in der Ebene der Erdbahn verteilt ist.

Das Verblüffende am interplanetaren Staub ist, dass es ihn eigentlich gar nicht geben sollte. Aus der Farbe des Zodiakallichts lässt sich für die Partikel ein Durchmesser von 20 bis 200 Mikrometern ableiten. Derart kleine Teilchen sollten sich unter dem Einfluss des Sonnenlichts langsam unserem Zentralgestirn nähern und dort verglühen (Kasten auf S. 33). Noch winzigere Staubpartikel hingegen sollten durch den Strahlungsdruck der Sonne aus dem Sonnensystem herausgeblasen werden. Wenn also trotzdem Staub vorhanden ist, muss von irgendwoher Nachschub kommen.

Sonnensystem wirbelt Staub auf

Die Astronomen vermuten, dass der Staub bei Zusammenstößen zwischen Asteroiden und in Sonnennähe bei der Verdampfung von Kometen entsteht. Im Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter sind Karambolagen zwischen den Gesteinsbrocken recht häufig. Dabei wird viel Staub freigesetzt. Zudem können größere Trümmerstücke der beiden Kollisionspartner noch für Jahrmillionen aneinander reiben und so weiteres Gestein pulverisieren. Im Falle der Kometen verdampft das Sonnenlicht das schmutzige Eis an ihrer Oberfläche und erzeugt auf diese Weise spektakuläre Schweife, die eine Staubspur auf ihrer Bahn zurücklassen. Wenn die Erde eine solche Staubansammlung kreuzt, machen sich diese Partikel als Meteorschauer bemerkbar – ein Beispiel ist der Strom der Perseiden im August jedes Jahres, der vom Kometen Swift-Tuttle herrührt. ▷

▷ Der freigesetzte Staub nimmt allmählich das gesamte innere Sonnensystem ein bis etwa zur Bahn des Jupiters. Zwar beträgt die Gesamtmasse des Staubs stets etwa nur ein Tausendstel der Masse des Erdmonds; doch auf Grund der großen Gesamtoberfläche der Partikel übertrifft die Helligkeit des Staubs jene der Planeten um das Hundertfache. Außerirdische Beobachter würden also zunächst dieses diffuse Leuchten wahrnehmen und erst bei genauerem Hinsehen Jupiter oder die Erde entdecken.

Das Wega-Phänomen

Die gleichen Prozesse laufen offenbar auch um andere Sterne herum ab. Im Jahr 1983 stieß der Infrarotsatellit Iras auf erste Anzeichen dafür. Fred Gillett vom Kitt Peak National Observatory in Tucson (Arizona) und Hartmut Aumann vom Jet Propulsion Laboratory in Pasadena (Kalifornien) richteten das von der Nasa gestartete Teleskop auf den hellen Stern Wega, um die Infrarotdetektoren des Instruments zu kalibrieren. Zu ihrer Verblüffung registrierten sie Infrarotstrahlung, die nicht vom Stern selbst, sondern von einer relativ kühlen Staubscheibe um ihn herum stammen musste.

Dieses Wega-Phänomen, wie es die Astronomen nannten, blieb kein Einzelfall. Bis Anfang der 1990er Jahre fanden sich in den Daten von Iras, der über 200 000 Infrarotquellen erfasste, Hinweise auf weitere 100 stellare Staubscheiben. Die meisten von ihnen waren freilich nicht direkt zu sehen; die Astronomen konnten nur indirekt auf ihre Anwesenheit schließen. Erst seit Ende der 1990er Jahre ist es mit Großteleskopen auf der Erde und im Weltraum gelungen, einige der Scheiben zu fotografieren. Die jüngsten Beobachtungen stammen von der 2002 am Hubble-Weltraumteleskop installierten Advanced Camera for Surveys (ACS) sowie vom Infrarotteleskop Spitzer, das seit August 2003 die Erde umkreist.

Gerade die jüngsten Bilder sorgten für Überraschungen. Eigentlich hatten die Astronomen strukturlose Scheiben erwartet. Stattdessen sehen einige dieser Gebilde aus wie gigantische Versionen der Saturnringe; andere enthalten riesige Knoten, Löcher und Spiralen.

Manche dieser Strukturen könnten von Planeten herrühren. Jedenfalls deutet die Anwesenheit einer Staubscheibe auf Kometen und Asteroiden hin – die ihrerseits ein Nebenprodukt der Planetenentstehung sind: Asteroiden als Fragmente größerer Objekte, die bei Kollisionen zerstört wurden, Kometen als so genannte Planetesimale, übrig gebliebene Planetenbausteine. In unserem Sonnensystem gibt es sowohl Asteroiden und Kometen als auch kleine Gesteins- und große Gasplaneten. Vermutlich ist eine solches Nebeneinander auch in anderen Planetensystemen anzutreffen.

Lange Zeit war das Forschungsgebiet, das sich der Planetenentstehung widmet, recht frustrierend – gab es doch nur unser eigenes Sonnensystem als Vorbild. Die Astronomen konnten niemals sicher sein, ob ihre Theorien auch auf andere Planetensysteme übertragbar sind. Nun kann die Beobachtung von Staubscheiben um andere Sterne – um solche mit anderen Massen und einem anderen Alter als unsere Sonne – dabei helfen, unser heimatliches Sonnensystem richtig in das Gesamtbild einzuordnen.

IN KÜRZE

- Einer der größten Erfolge der Astronomie in den vergangenen zehn Jahren war die **Entdeckung von Planeten** bei anderen Sternen – der erste verlässliche Hinweis darauf, dass wir möglicherweise nicht allein sind im Kosmos.
- Doch diese Entdeckung ist nur ein kleiner Teil des Puzzles. Die Planetenjäger finden zumeist nur die größten Welten. Sie übersehen die vielfältigeren kleineren Himmelskörper, die **Kometen und Asteroiden**. Diese Eis- und Gesteinsbrocken haben als Überreste der Planetenentstehung eine große Bedeutung.
- Um diesen kleineren Himmelskörpern auf die Spur zu kommen, suchen die Astronomen nach dem Staub, der bei Zusammenstößen entsteht. Inzwischen haben die Beobachter solche **Staubscheiben** bei über 100 Sternen gefunden. Von rund einem Dutzend dieser Scheiben gelang es sogar, Aufnahmen zu machen. Die bisherigen Befunde weisen darauf hin, dass die Entstehung von Planeten bei anderen Sternen ähnlich verläuft wie in unserem Sonnensystem.

Iras war einer der erfolgreichsten Astronomiesatelliten. Obwohl er nur für zehn Monate des Jahres 1983 in Betrieb war, sind die von ihm gesammelten Daten noch heute eine Fundgrube für die Forscher. Sein Teleskop durchmusterte den kompletten Himmel im mittleren und fernen Infrarotbereich, bei Wellenlängen von 12, 25, 60 und 100 Mikrometern. Diese Bereiche des elektromagnetischen Spektrums sind vom Erdboden aus kaum beziehungsweise überhaupt nicht zu beobachten, da die Erdatmosphäre Strahlung dieser Wellenlängen fast vollständig absorbiert. Die Quellen derartiger Strahlung sind relativ kalt: Ihre Temperatur liegt zwischen 50 und 100 Kelvin. Normale Sterne, deren Oberflächen Tausende von Kelvin heiß sind, leuchten zwar ebenfalls im Infraroten, ihr Strahlungsmaximum liegt aber im sichtbaren Bereich des Spektrums.

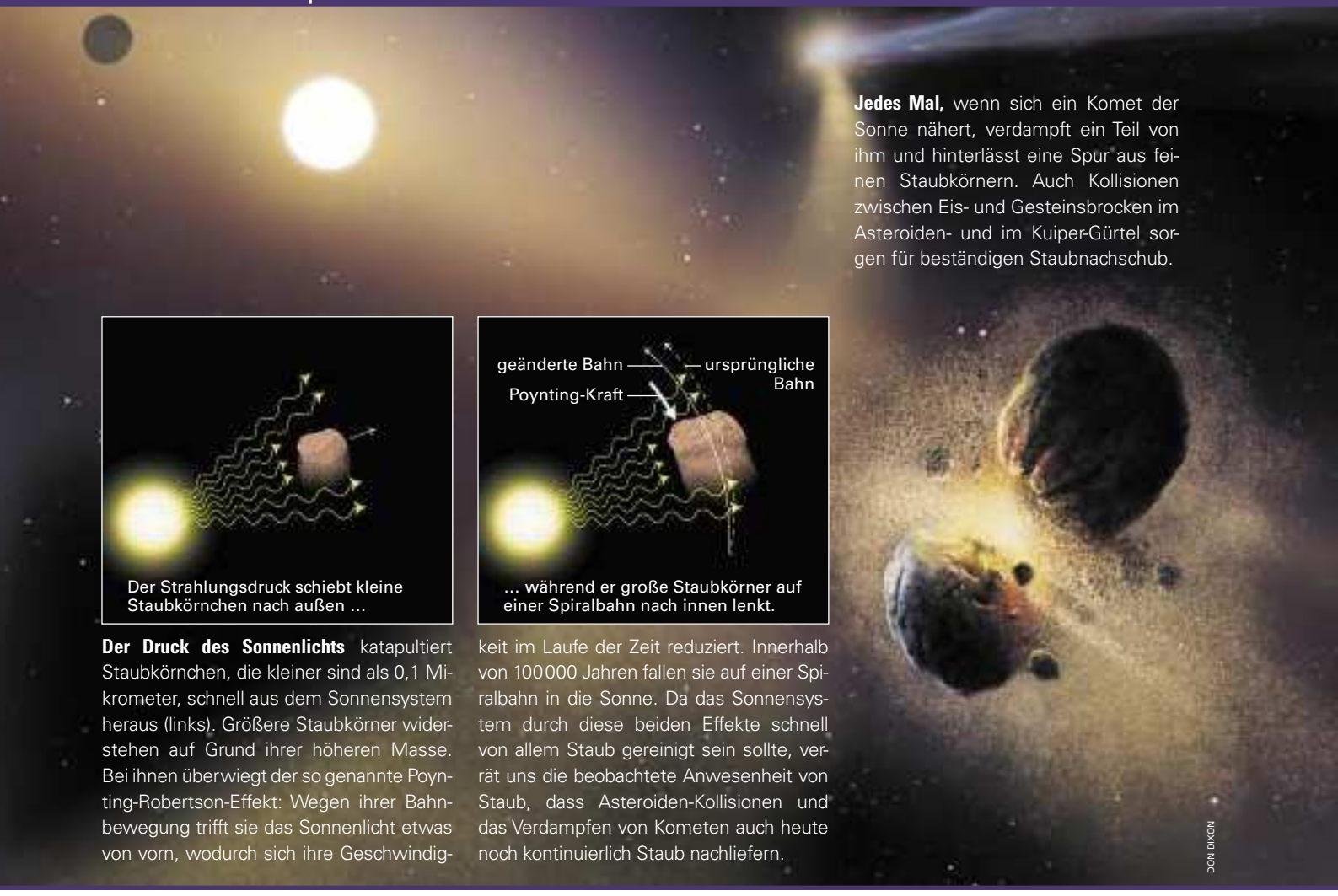
Eigenschaften der Staubscheiben

Doch wie Iras zeigte, strahlen manche Sterne im Infraroten zehn- oder gar hundertmal heller als andere. Dieser Infrarotüberschuss deutet auf die Anwesenheit von Staub um den Stern herum hin. Das Sternlicht heizt den Staub auf, der dann Wärmestrahlung aussendet und im Spektrum des Sterns einen »Buckel« im Infrarotbereich erzeugt (siehe Kasten auf S. 35). Diese Sterne sind so alt, dass der Staub nicht aus der Zeit ihrer Entstehung übrig geblieben sein kann. Der Staub muss also – wie in unserem Sonnensystem – durch Kollision oder Verdampfung von Himmelskörpern entstanden sein, die für uns unsichtbar sind.

Die Auflösung von Iras reichte nicht aus, die Scheiben direkt sichtbar zu machen – abgesehen von vier Ausnahmen. Auf den Iras-Bildern erscheinen die Sterne als Punkte ohne jede Struktur. Doch aus der Helligkeit der Scheiben lässt sich ihre Ausdehnung abschätzen, denn größere Scheiben rufen einen stärkeren Infrarotüberschuss hervor. Das Ergebnis: Die Größe der Scheiben scheint zwischen 100 und 1000 Astronomischen Einheiten zu liegen; das entspricht dem 20- bis 200fachen des Abstands Sonne-Jupiter.

Weitere Erkenntnisse brachte der europäische Infrarotsatellit Iso, der von November 1995 bis Mai 1998 in Betrieb war und den Wellenlängenbereich von 2,5 bis 240 Mikrometern lückenlos abdeckte. Damit war nun auch sehr kalter Staub

Was der interplanetare Staub verrät



Jedes Mal, wenn sich ein Komet der Sonne nähert, verdampft ein Teil von ihm und hinterlässt eine Spur aus feinen Staubkörnern. Auch Kollisionen zwischen Eis- und Gesteinsbrocken im Asteroiden- und im Kuiper-Gürtel sorgen für beständigen Staubnachschub.

Der Strahlungsdruck schiebt kleine Staubkörnchen nach außen …

… während er große Staubkörner auf einer Spiralbahn nach innen lenkt.

Der Druck des Sonnenlichts katapultiert Staubkörnchen, die kleiner sind als 0,1 Mikrometer, schnell aus dem Sonnensystem heraus (links). Größere Staubkörner widerstehen auf Grund ihrer höheren Masse. Bei ihnen überwiegt der so genannte Poynting-Robertson-Effekt: Wegen ihrer Bahnbewegung trifft sie das Sonnenlicht etwas von vorn, wodurch sich ihre Geschwindigkeit im Laufe der Zeit reduziert. Innerhalb von 100000 Jahren fallen sie auf einer Spiralbahn in die Sonne. Da das Sonnensystem durch diese beiden Effekte schnell von allem Staub gereinigt sein sollte, verrät uns die beobachtete Anwesenheit von Staub, dass Asteroiden-Kollisionen und das Verdampfen von Kometen auch heute noch kontinuierlich Staub nachliefern.

DON DIXON

mit Temperaturen um 12 Kelvin zugänglich, in dem die größte Masse einer stellaren Staubscheibe steckt. Und die spektroskopischen Fähigkeiten von Iso eröffneten das Zeitalter der Astromineralogie: So zeigten die Spektren, dass die Zusammensetzung der Staubscheiben jener der solaren Kometen ähnelt; beide Objektklassen enthalten kristalline Silikate.

Anhand des Spektrums lässt sich auch auf die räumliche Anordnung des Staubs schließen. Die von Iras und Iso aufgespürten Scheiben überdecken einen großen Temperaturbereich: Die inneren Teile der Scheiben, dicht bei den Sternen gelegen, sind wärmer als die äußeren Regionen. Bemerkenswert ist, dass die meisten Scheiben keinen Staub enthalten, der wärmer als 200 Kelvin ist. Das ist deutlich kühler als man erwarten würde, wenn die Scheibe bis nahe an den Stern heranreicht. Folglich scheinen die Scheiben in ihrer Mitte Aussparungen aufzuweisen. Diese Lücken waren das erste Indiz für die Astronomen, dass die Scheiben eine Struktur aufweisen – eine, die vielleicht von verborgenen Planeten hervorgerufen wird.

Sonderfall Beta Pictoris

Im Jahr 1984 nahmen Bradford A. Smith, damals an der Universität von Arizona, und Richard J. Terrile vom Jet Propulsion Laboratory einen weiteren Stern mit Staubscheibe, Beta Pictoris, näher unter die Lupe. Die beiden Astronomen nutzten das 2,5-Meter-Teleskop der Sternwarte Las Campanas in Chile. Um die gegenüber dem hell strahlenden Stern nur schwach leuchtende Scheibe sichtbar zu machen, setzten sie einen Koronografen ein, der die direkte Strahlung des Sterns mit einer kleinen Maske verdeckte. Im sichtbaren Licht zeigte sich, dass wir bei Beta Pictoris genau die Kante einer Scheibe sehen, die sich 400 Astronomische Einheiten vom Stern weg erstreckt. Spätere Beobachtungen ergaben sogar einen Radius von 1400 Astronomischen Einheiten.

Beta Pictoris ist ein Sonderfall. Der Stern ist uns mit einer Entfernung von 60 Lichtjahren relativ nah, seine Scheibe ist sehr groß, sehr hell, und wir schauen genau auf ihre Kante. Durch dieses Zusammentreffen ist die Scheibe recht leicht zu sehen. Der Einsatz von Koronografen bei anderen Sternen blieb leider erfolglos. Vom Erdboden aus gesehen haben Sterne einen bestimmten Winkeldurchmesser, der von dem störenden Einfluss der Atmosphäre auf das Sternlicht abhängt. Ein Koronograf, dessen Maske das Sternscheibchen abdeckt, verdeckt leider zumeist auch die Staubscheibe. Bei längeren Wellenlängen, etwa im fernen Infrarot, ist der Helligkeitsunterschied zwischen Stern und Scheibe geringer, die Scheiben wä- ▷

▷ ren also leichter zu sehen – doch leider absorbiert die Erdatmosphäre diese Strahlung. Licht mit noch längeren Wellenlängen bis hin zu einem Millimeter kann zwar wieder vom Erdboden aus empfangen werden, doch bis Ende der 1990er Jahre hatten Submillimeter-Teleskope nur eine geringe Empfindlichkeit und Auflösung. Deshalb vergingen 13 Jahre, bis der Fortschritt der Instrumententechnik es endlich ermöglichte, auch die Scheiben anderer Sterne abzubilden.

Der Durchbruch gelang mit dem Submillimeter Common-User Bolometer Array (Scuba), einer sehr empfindlichen Kamera zum Nachweis von Submillimeter-Strahlung. 1997 baute ein Forscherteam um Wayne S. Holland und Jane S. Greaves, damals am Joint Astronomy Center in Hawaii, diese Kamera an das James-Clerk-Maxwell-Teleskop auf Hawaii und fotografierte damit mehrere Iras-Sterne. Diese und weitere Bilder bestätigten die Existenz von Staubscheiben endlich auch für andere Sterne als Beta Pictoris.

Seither konnten mit Scuba, mit erdgebundenen Detektoren für Infrarotstrahlung mittlerer Wellenlänge sowie mit dem Hubble-Weltraumteleskop ein Dutzend stellarer Scheiben aufgelöst werden. In einigen Fällen zeigte sich allerdings auch, dass Hintergrundobjekte oder nahe interstellare Wolken für den mit Iras beobachteten Infrarotüberschuss verantwortlich waren.

Kometenschwärme

Die meisten der bekannten Staubscheiben um ferne Sonnen sind erheblich größer und kühler als diejenige, die das Zodiakallicht erzeugt. Der Grund dafür wurde offensichtlich, als Astronomen – beginnend im Jahre 1992 – immer mehr eisige Himmelskörper entdeckten, die weit außerhalb der Plutobahn die Sonne umrunden. Damit bestätigte sich, was der niederländisch-amerikanische Astronom Gerard Peter Kuiper bereits 1951 vermutete: dass es in den Außenbezirken des Sonnensystems eine Zone gibt, in der sich unzählige Eisbrocken tummeln (siehe »Der Kuiper-Gürtel«, Spektrum der Wissenschaft 7/1996, S. 56). Kollisionen in dieser Zone sollten eine zweite Staubscheibe erzeugen – und zwar eine vergleichsweise kühle, die zehnmal mehr Staub enthält als die Zodiakallichtzone. Diese ausgedehnte Scheibe ist von der Erde aus nur schwer auszumachen, da wir selbst in die warme, helle Strahlung des Zodiakallichts eingebettet sind.

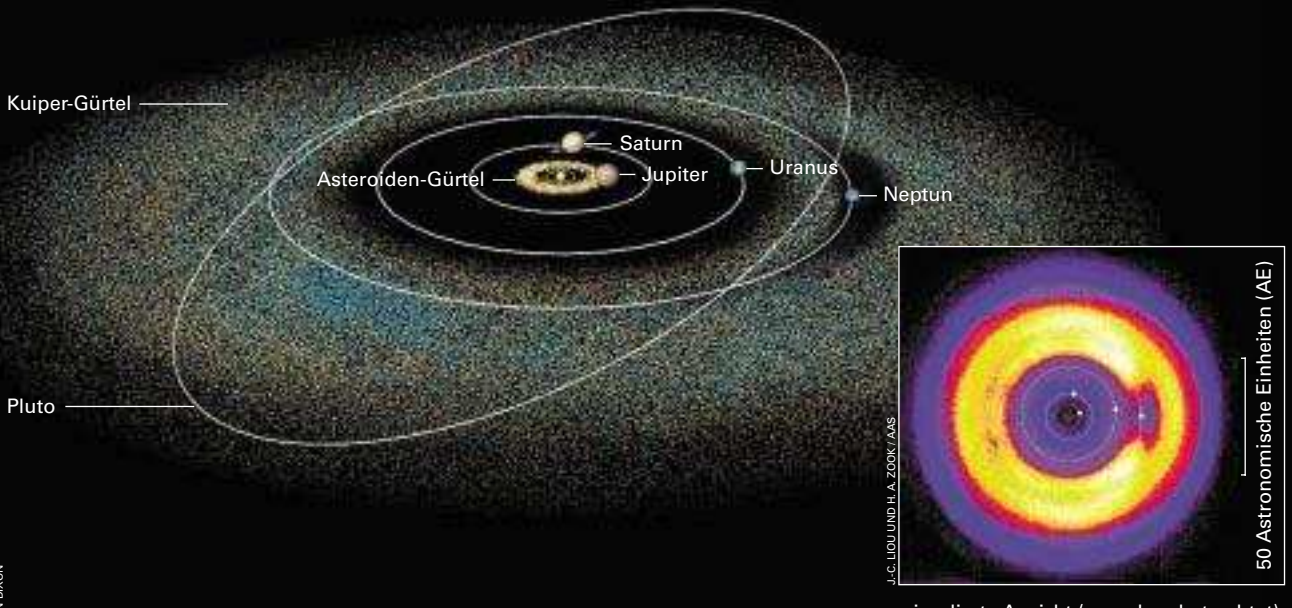
Den Staubscheiben bei anderen Sternen scheint also in unserem Sonnensystem die Scheibe des Kuiper-Gürtels zu entsprechen, und nicht jene des Zodiakallichts. Allerdings scheint auch die Zodiakallichtzone ein allgemeineres Phänomen zu sein, denn in manchen der großen, kühlen stellaren Scheiben konnten die Astronomen ebenfalls eine kleinere, wärmere Scheibe nachweisen.

Unterschiede gibt es indes in der Ausdehnung der Staubzonen: Die Scheibe um Beta Pictoris etwa enthält 10 000-mal so viel Staub wie unser Sonnensystem. Da die Kollisionsrate der Planetesimale – und damit die Produktion von Staub – quadratisch mit der Anzahl dieser Objekte steigt, lässt sich folgern, dass Beta Pictoris von etwa 100-mal so vielen Planetesimalen umkreist wird wie unsere Sonne.

Die Astronomen vermuten, dass dieser Unterschied mit dem Alter der Sterne zusammenhängt: Die Sonne ist 4,5 Milliarden Jahre alt, Beta Pictoris hingegen nur 15 Millionen Jahre. Tatsächlich weisen die Beobachtungen darauf hin, dass die Staubmenge um einen Stern mit seinem Alter abnimmt (Kasten auf S.

Geformt von Planeten

Staub ist nicht nur Indikator für Asteroiden und Kometen, er kann auch die Anwesenheit von Planeten verraten. In unserem Sonnensystem ist es offenbar die Schwerkraft der Riesenplaneten, die dem Kuiper-Gürtel – einer ausgedehnten Scheibe aus eisigen Brocken in den Außenbezirken des Sonnensystems – seine Struktur verleiht. Von außen betrachtet, wären auf einem Infrarot-Bild Lücken und Verdichtungen erkennbar (Inset). Ähnliches beobachten Astronomen bei anderen Sternen.



DON DIXON

J.-C. LIOU UND H. A. ZOOK / AAS

simulierte Ansicht (von oben betrachtet)

37), vermutlich weil die Population der Planetesimale sich langsam auflöst. Eben jene Zusammenstöße, die Staub erzeugen, zerstören auch die Kollisionspartner. Zudem kann die gravitative Wechselwirkung mit den Planeten die kleineren Himmelskörper wie Asteroiden und Kometen aus dem System herausschleudern – oder in den Zentralstern hineinwerfen. Das Spektrum von Beta Pictoris zeigt Absorptionslinien, die auftauchen und wieder verschwinden. Die Astronomen vermuten, dass sie durch verdampfende Kometen verursacht werden. Rund 200 dieser »schmutzigen Schneebälle« ereilt jedes Jahr dieses Schicksal.

Als unser Sonnensystem noch jung war, wimmelte es darin von ähnlich vielen Kometen und Asteroiden. Die Scheiben anderer Sterne könnten im Laufe der Zeit ebenfalls ausdünnen und sich zu Systemen entwickeln, die unserem ähneln.

Wo stecken die Planeten bloß?

Aber auch wenn das Alter der Sterne einige der Unterschiede zwischen unserem Sonnensystem und anderen Systemen zu erklären vermag, müssen die Astronomen bei der Interpretation ihrer Beobachtungen vorsichtig sein. Die meisten Sterne mit Infrarotüberschuss sind massereicher als die Sonne. Das könnte an einem Auswahleffekt liegen: Massereiche Sterne sind heißer und erwärmen den Staub deshalb stärker, der dadurch besser zu sehen ist. Zudem ist nicht auszuschließen, dass massereichere Sterne anfangs von einer größeren Scheibe mit höherem Staubanteil umgeben sind. Es ist deshalb unklar, inwieweit sich die Schlüsse, welche die Forscher aus der Beobachtung dieser Systeme ziehen, verallgemeinern lassen. So könnten heißere Sterne ihre Scheiben, in denen Planeten entstehen, schneller auflösen und so die Planetenentstehungsrate und die Entwicklung der Planetesimale beeinflussen.

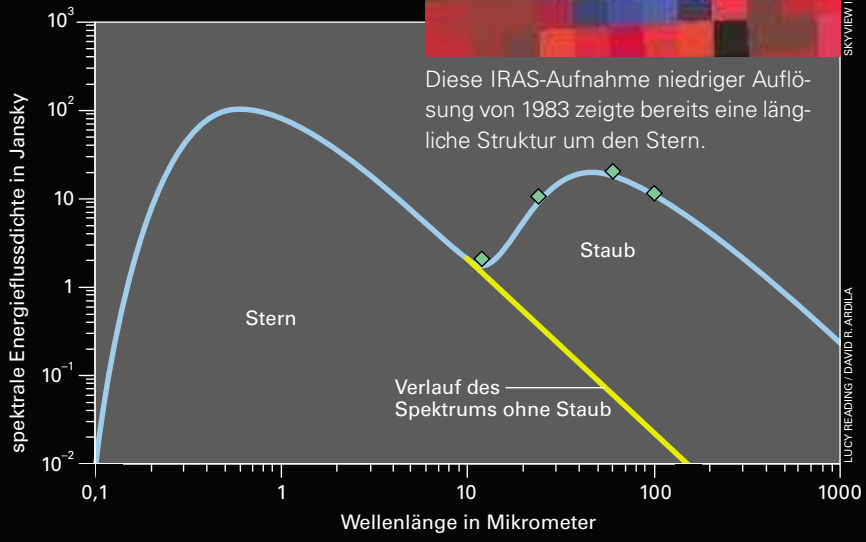
Enthalten die Staubscheiben fremder Sterne überhaupt Planetesimale und Planeten? Selbst die jüngsten von ihnen hatten ausreichend Zeit, um Riesenplaneten hervorzubringen. Heute gibt es in den Scheiben nur noch wenig Gas, also können sich jetzt keine Riesenplaneten mehr formen, die überwiegend aus gasförmigen Substanzen bestehen. Demnach sind derart massereiche Trabanten entweder bereits vorhanden, oder sie werden niemals entstehen. Es ist schwer herauszu- ▷

Beta Pictoris

Die Staubscheibe des Sterns Beta Pictoris, 63 Lichtjahre von uns entfernt, ist die am besten untersuchte außerhalb des Sonnensystems.

SKYVIEW IMAGE ARCHIVE

Diese IRAS-Aufnahme niedriger Auflösung von 1983 zeigte bereits eine längliche Struktur um den Stern.

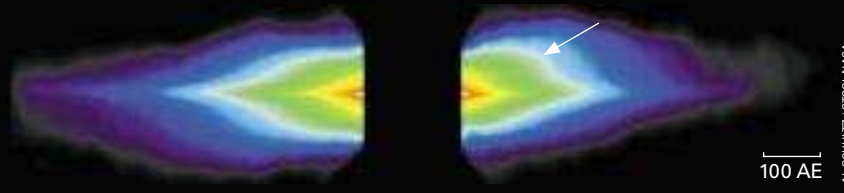


LUCY READING / DAVID R. ARDILA

Die Energieverteilung im Spektrum von Beta Pictoris weicht von derjenigen eines normalen Sterns ab. Der Energieüberschuss im Infraroten ist ein deutlicher Hinweis auf die Anwesenheit von Staub. Die grünen Symbole kennzeichnen Iras-Messungen.

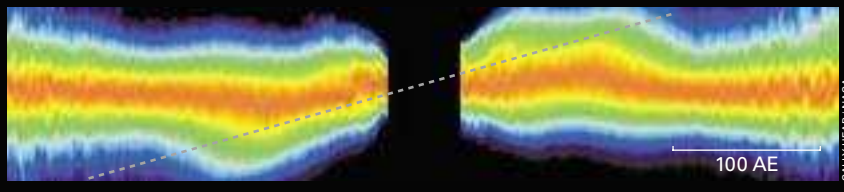
R. J. TERRILE UND B. A. SMITH

Die Detailaufnahme im sichtbaren Licht von 1984 zeigt eine Scheibe von der Seite. Die dunklen Linien und Kreise sind Artefakte der Blende zur Abdeckung des Sterns.



AL SCHULTZ / STSCI, NASA

Diese Aufnahme vom Hubble-Weltraumteleskop im sichtbaren Licht von 1995 verrät ein »Aufflammen« in der Scheibe (Pfeil), möglicherweise ausgelöst durch einen Braunen Zwerg oder einen vorüberziehenden Stern. Die unterschiedlichen Helligkeiten in der Scheibe sind hier farbkodiert.



SALLY HEAP / NASA

Die Hubble-Aufnahme von 1997 zeigt eine Verbiegung der inneren Scheibenregion (gestrichelte Linie). Diese und andere Strukturen in der Scheibe deuten auf die Anwesenheit eines Riesenplaneten in einem zur Scheibenebene geneigten Orbit.

finden, was davon zutrifft. Noch ist unser Sonnensystem das einzige bekannte System, das sowohl über Planeten als auch über eine Staubscheibe verfügt. Von fremden Sternen kennt man bisher nur das eine oder das andere: Dort, wo es Staubscheiben gibt, konnte man noch keine Planeten nachweisen, und dort, wo man Planeten gefunden hat, gibt es keine Hinweise für eine Staubansammlung.

Freilich könnten die Scheiben die Anwesenheit von Planeten indirekt verraten. So wäre etwa der Einfall von Kometen auf Beta Pictoris ohne den gravitativen Einfluss von Planeten nur schwer zu verstehen. Außerdem weisen die wenigen fotografierten Staubscheiben großräumige Strukturen auf: Ringe, Verbiegungen, Verdichtungen und in einem Fall sogar eine große Spirale (siehe Kasten auf dieser Seite). Ein Planet in einem zur Ebene der Staubscheibe geneigten Orbit kann Staub in ebenfalls geneigte Bahnen ziehen und somit die Scheibe verbiegen. Zudem können Planeten wie gigantische Staubsauger wirken und Hohlräume und ringförmige Zonen freiräumen, oder sie drängen den Staub einfach zur Seite und verdichten ihn damit. Auch unsere Erde hinterlässt in der Zodiakallichtscheibe eine deutliche Fährte.

Andererseits belegen diese Fakten das Vorhandensein von Planeten in den Scheiben nicht so schlüssig, wie es die Astronomen gern hätten. Damit Planeten solche beobachtbaren Strukturen hervorrufen können, müssten sie ihren Zentralstern in einem Abstand umkreisen, der größer wäre als der Radius der Neptunbahn. So weit weg aber können sich möglicherweise gar keine Planeten gebildet haben, denn der Entstehungsprozess dauert umso länger, je größer der Abstand zum Stern ist. Zwar wäre es denkbar, dass sich manche Planeten weiter innen gebildet haben und dann nach außen gedriftet sind – so, wie es möglicherweise auch Neptun ergangen ist. Die Erhaltung des Drehmoments würde jedoch erfordern, dass zum Ausgleich ein anderer Planet (im Falle des Sonnensystems etwa der Jupiter) nach innen wanderte. Im Allgemeinen gibt es jedoch keinerlei Hinweise auf einen solchen zweiten Planeten in den Scheiben.

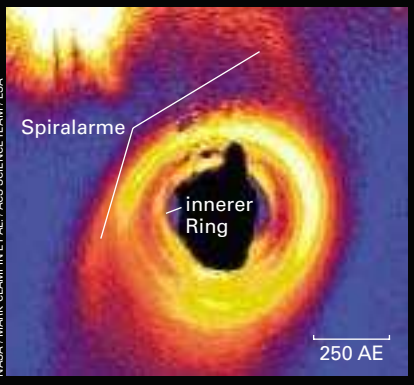
Die Daten lassen sich vielfältig interpretieren: Welche Massen und welche Abstände den vermuteten Planeten zugeschrieben werden, hängt denn auch von der jeweiligen Forschergruppe ab.

Dynamik der Staubscheiben

Für einige der beobachteten Strukturen kämen neben dem Schwerkrafteinfluss von Planeten noch andere Prozesse in Betracht. So folgern einige Astronomen, alle jungen Planetensysteme hätten Ringe; wenn die Planetesimale anwüchsen und sich zu Planeten zusammenlagerten, veränderten sie die Dynamik der Scheibe, was die Kollisionsrate und somit auch die Staubproduktion erhöhen würde. Andere argumentieren, am Rand von Gasscheiben könnten sich spontan Ringe herausbilden: Die abrupte Änderung des Gasdrucks am Rand würde die Staubteilchen abbremsen, die sonst aus dem System herauskatapultiert würden.

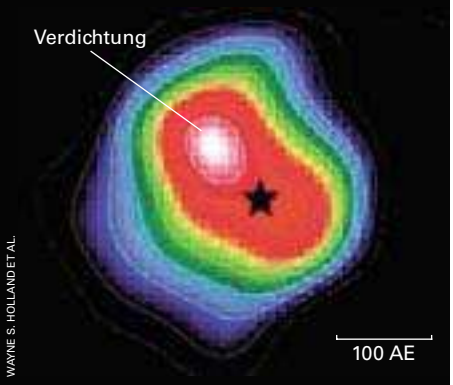
Es ist ein wichtiges Ziel der astronomischen Forschung geworden, die Struk-

Hinweise auf Planeten in den Staubscheiben?



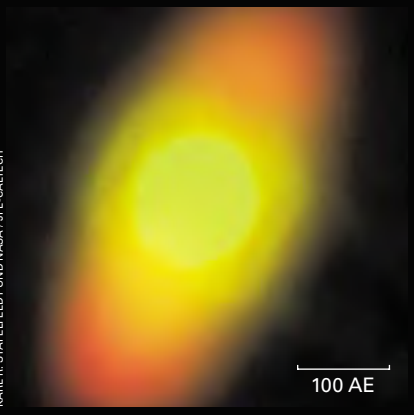
NASA / MARK CLAMPIN ET AL. / ACS SCIENCE TEAM / ESA

Die Staubscheibe um den 330 Lichtjahre entfernten Stern **HD 141569** weist zwei große Spiralarme auf. Möglicherweise sind sie von der oben links erkennbaren zweiten Komponente dieses Mehrfachsterns verursacht werden. Ein innerer Ring in der Scheibe könnte ein Hinweis auf einen nicht sichtbaren Planeten sein. Die Farben repräsentieren die Dichte des im sichtbaren Licht fotografierten Materials.



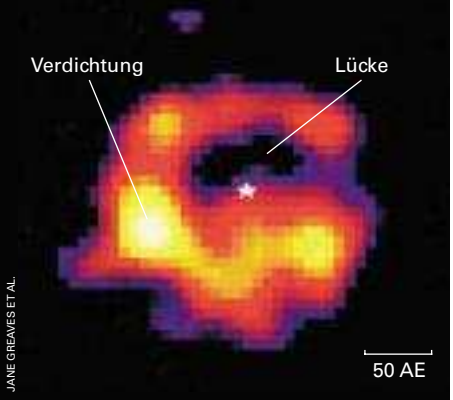
WAYNE S. HOLLAND ET AL.

Im Submillimeter-Bereich aufgenommen, offenbart die 25 Lichtjahre entfernte **Wega** einen hellen Klumpen in ihrer Staubscheibe. Computersimulationen zeigen, dass diese Verdichtung von einem Planeten mit der doppelten Jupitermasse herrühren könnte. Das schwarze Sternsymbol markiert die Position des Zentralsterns. Wega und HD 141569 haben jeweils die doppelte Masse der Sonne.



KARL R. STAPELFELDT UND NASA / JPL-CALTECH

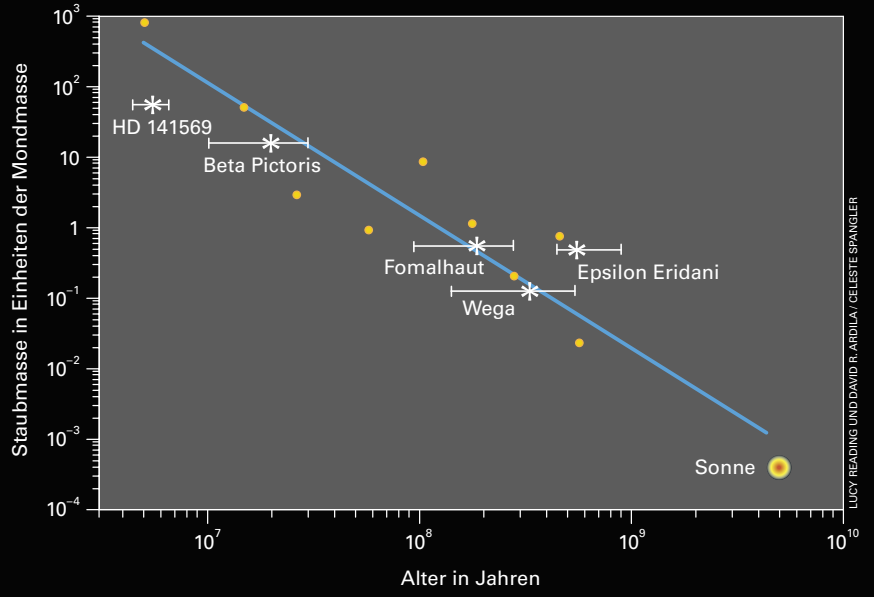
Die Staubscheibe um den 25 Lichtjahre entfernten Stern **Fomalhaut** ist asymmetrisch: Sie erscheint auf dieser Infrarot-Aufnahme unten links größer als oben rechts. Als Ursache kommt eine Asteroiden-Kollision in jüngerer Zeit in Frage. Das Zentrum des Rings ist mit warmem Staub angefüllt, ähnlich der Zodiakallichtzone in unserem Sonnensystem.



JANE GREAVES ET AL.

Die Staubscheibe um **Epsilon Eridani,** zehn Lichtjahre von uns entfernt, zeigt auf diesem Submillimeter-Bild Klumpen und Lücken, entstanden möglicherweise unter dem Einfluss eines saturngroßen Planeten auf einer elongierten Umlaufbahn. Unabhängige, aber noch umstrittene Spektraldaten deuten auf einen zweiten Planeten weiter innen hin.

Alter-Masse-Beziehung



Je älter die Sterne, desto weniger Staub zeigen sie – vermutlich, weil die Asteroiden und Kometen, von denen der Staub stammt, langsam zerstört werden. Der Zusammenhang zwischen Alter und Staubmasse gilt zwar nicht streng, aber er deutet an, dass alle Systeme sich etwa in gleicher Art und Weise entwickeln. Die Daten stammen vom europäischen Infrared Space Observatory (Iso). Die orangefarbenen Punkte repräsentieren Sternhaufen. Der mit »Sonne« beschriftete Punkt berücksichtigt nur das Zodiakallicht. Die Staubmenge im Kuiper-Gürtel ist unbekannt, könnte aber zehnmal größer sein.

turen in den Staubscheiben zu verstehen. Im vergangenen Jahr habe ich zusammen mit einigen Kollegen den Stern HD 141569 mit dem ACS-Koronografen des Hubble-Teleskops beobachtet. Frühere Aufnahmen hatten zwei Ringe um diesen Stern gezeigt. Unsere Bilder enthüllten nun lange Spiralarme aus Staub, ähnlich den Armen von Spiralgalaxien – vermutlich handelt es sich bei den früher gesehenen Ringen um Teile dieser Spiralen. HD 141569 bildet mit zwei weiteren Sternen ein Dreifachsystem. Wir vermuten, dass einer dieser Sterne vor weniger als 100 000 Jahren nahe an der Scheibe vorbeigezogen ist und sie dadurch gestört und auseinander gezogen hat. Diese Wechselwirkung könnte die Spiralen verursacht haben. Andere Forscher stimmen mit uns darin überein, dass wiederholte Vorübergänge der Sterne die Scheibe geformt haben. Demnach können auch andere Himmelskörper als Planeten für Strukturen in einer Staubscheibe verantwortlich sein.

Die Unsicherheiten in der Interpretation der Bilder rühren hauptsächlich von der geringen Anzahl der fotografisch erfassten Staubscheiben her. Jede dieser Scheiben ist ein Spezialfall. Mit dem neuen Spitzer-Weltraumteleskop wird sich die Situation erheblich ändern. Eine der wichtigsten Aufgaben dieses Instruments ist es, eine große Zahl von Staubscheiben zu beobachten. Das Teleskop verfügt wie Iras über Detektoren für den fernen Infrarotbereich, ist aber 1000-fach empfindlicher. Sie können daher noch weit geringere Staubmengen nachweisen und so die bisherige Sammlung von Staubscheiben vergrößern.

Sonnensystem fällt aus dem Rahmen

Im Dezember 2003 veröffentlichten Karl R. Stapelfeldt vom Jet Propulsion Laboratory und seine Koautoren eine erste Aufnahme des Spitzer-Teleskops von der Staubscheibe um den Stern Fomalhaut.

Bei einer Wellenlänge von 70 Mikrometern wird die Form der Scheibe sichtbar: ein von der Kante gesehener Ring mit einem Radius von 200 Astronomischen Einheiten. Die eine Seite des Rings erscheint heller als die andere – vielleicht die Folge einer kürzlichen Asteroidenkollision oder des gravitativen Einflusses eines für uns unsichtbaren Planeten. Bei einer Wellenlänge von 24 Mikrometern taucht nahe am Stern eine Ansammlung warmen Materials auf – ein klares Analogon zu unserer Zodiakallichtzone. Daraus lässt sich folgern, dass Fomalhaut ebenfalls so etwas wie einen Asteroidengürtel hat.

Aus den stellaren Staubscheiben haben die Astronomen gelernt, dass auch um andere Sterne Asteroiden und Kometen kreisen – eine Folge der Planetenentstehung. Unser Sonnensystem scheint also anderen Planetensystemen grundsätzlich zu ähneln. Andererseits enthält selbst die kleinste bislang entdeckte stellare Staubscheibe 50-mal so viel Staub wie unser Sonnensystem. Liegt das daran, dass die Planeten bei uns bereits die meisten Planetesimale aus dem System herausgeschleudert haben? Hatte unsere Sonne vielleicht von Anfang an eine kleinere Staubscheibe? Oder sind die Beobachtungsinstrumente einfach noch nicht empfindlich genug, um Systeme ähnlich unserem eigenen aufspüren zu können?

Den Astronomen fehlt bislang noch ein detailliertes und konsistentes Gesamtbild der Entstehung und Entwicklung von Planetensystemen um Sterne unterschiedlicher Masse. Weitere Beobachtungen mit Weltraum- und irdischen Teleskopen werden Beiträge zu diesem Bild liefern. Dann werden wir irgendwann wissen, ob unser Sonnensystem etwas Besonderes unter all den möglichen Planetensystemen ist. ◁

David R. Ardila studierte Physik an der Universidad de los Andes in Bogota und promovierte an der Universität von Kalifornien in Berkeley. 2002 trat er dem Advanced Camera for Surveys Science Team der Johns-Hopkins-Universität in Baltimore bei. Neben Staubscheiben interessiert sich Ardila für protostellare Scheiben, für Planetenentstehung und für Braune Zwerge.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Riesen-Planeten umkreisen ferne Sonnen. Von Geoffrey W. Marcy und R. Paul Butler, in: Spektrum der Wissenschaft, Dossier Planeten, Sterne und Weltraum (1998)

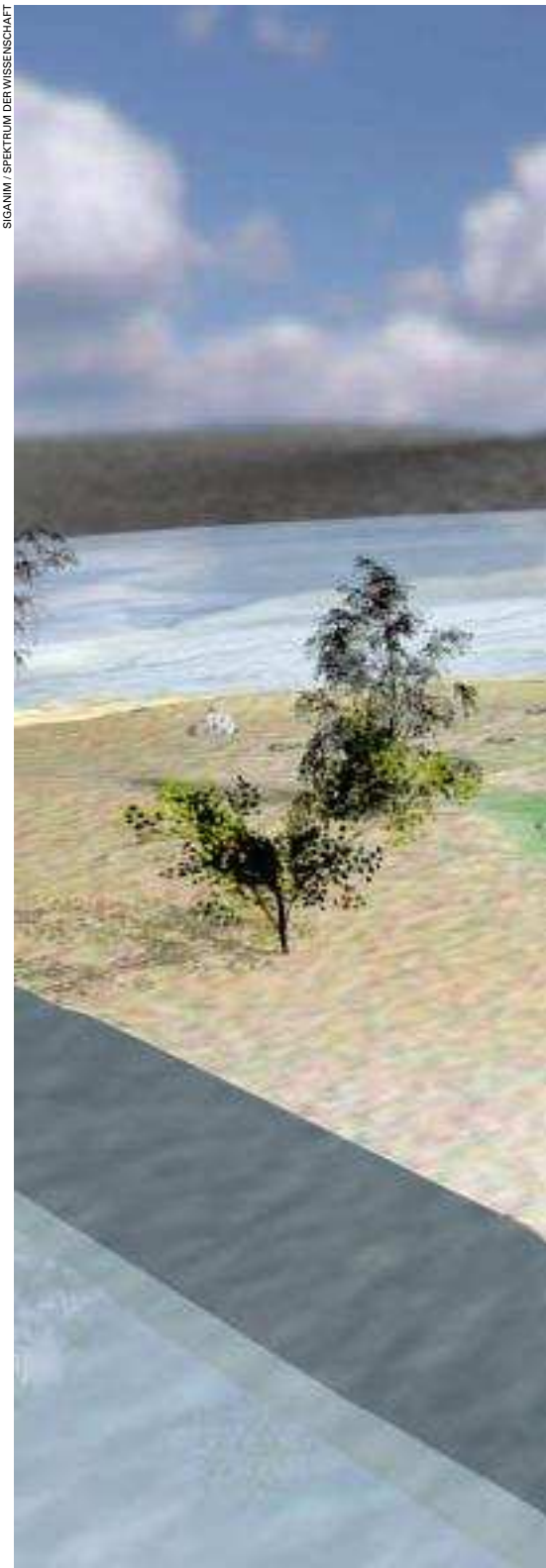
Kosmischer Staub. Von Ulf Borgeest, in: Spektrum der Wissenschaft, Heft 2/1996, S. 56

Distant wanderers. The search for planets beyond the solar system. Von Bruce Dorminey. Springer-Verlag, 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Die Urmenschen von Thüringen

Vor rund 370 000 Jahren lebte lange vor den Neandertalern an einem kleinen See im heutigen Thüringen eine Gruppe von Urmenschen. Der Leiter des internationalen Teams, das die Grabungen und Analysen durchführte, schildert hier die bahnbrechenden Befunde aus 35 Jahren Forschung.



SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Von Dietrich Mania

Noch vor wenigen Jahrzehnten hätte wohl niemand damit gerechnet, dass von frühen Menschen jemals eine so gut erhaltene Siedlung gefunden würde. Die Gruppe, die sich bei Bilzingsleben im nördlichen Thüringen niedergelassen hatte, lebte lange vor dem Neandertaler in einer gemäßigt-warmen Phase der mittleren Eiszeit. Der reiche Fundort offenbart nicht nur bis in Einzelheiten, wie dieser *Homo erectus* sich materiell-ökologisch mit seiner Umwelt auseinander setzte, ja sie sich für sozio-kulturelle Zwecke gestaltete, sondern liefert auch Zeugnisse von seinem erwachenden Geist – und vielleicht ersten Ansätzen einer ideellen Weltsicht.

Auf der Stätte lagerten sich später mächtige Travertinschichten ab, die den Ort hervorragend konservierten. Heute bilden sie einen Bergsporn, die »Steinrinne«, auf der diese Kalksteine später abgebaut wurden. Schon früher waren Forscher hier auf steinzeitliche Werkzeuge gestoßen. Anfang des 19. Jahrhunderts soll in dem Steinbruch sogar ein menschlicher Schädel gefunden worden sein. Bei geologischen Geländearbeiten stieß ich 1969 auf eine Schicht aus einer Warmzeit des mittleren Eiszeitalters, die reichlich Artefakte und Tierfossilien enthielt.

Als ich wenige Jahre später erkannte, dass ein Knochenstück, das ich in dieser Schicht 1972 ausgegraben hatte, ein menschliches Hinterhauptsbein darstellt, ging die Meldung dieser Entdeckung rasch um die Welt. Nun richtete das Landesmuseum für Vorgeschichte in Halle vor Ort eine Außenstelle ein, die spätere Forschungsstelle Bilzingsleben. Sie kam 1993 zur Universität Jena und wird seit 1996 auch vom Förderverein »Bilzingsleben – World Culture Monument« e.V. betreut.

Zahlreiche Wissenschaftler verschiedener Fachrichtungen – von der Geologie bis zur Anthropologie – aus dem In- und Ausland haben bei den Ausgrabungen und Auswertungen mitgewirkt. Viele von ihnen sind in diesem Team bis heute aktiv.

Die geologischen Untersuchungen und mehrere Datierungen zeigten mit Sicherheit, dass die Siedlung in die Zeit zwischen die so genannte Elster- und Saalevereisung fällt und etwa 370 000 Jahre alt ist. Neben vielen tausend Objekten der materiellen Kultur entdeckte unser Team weitere Menschenfossilien. Als wir 1975 das nächste menschliche

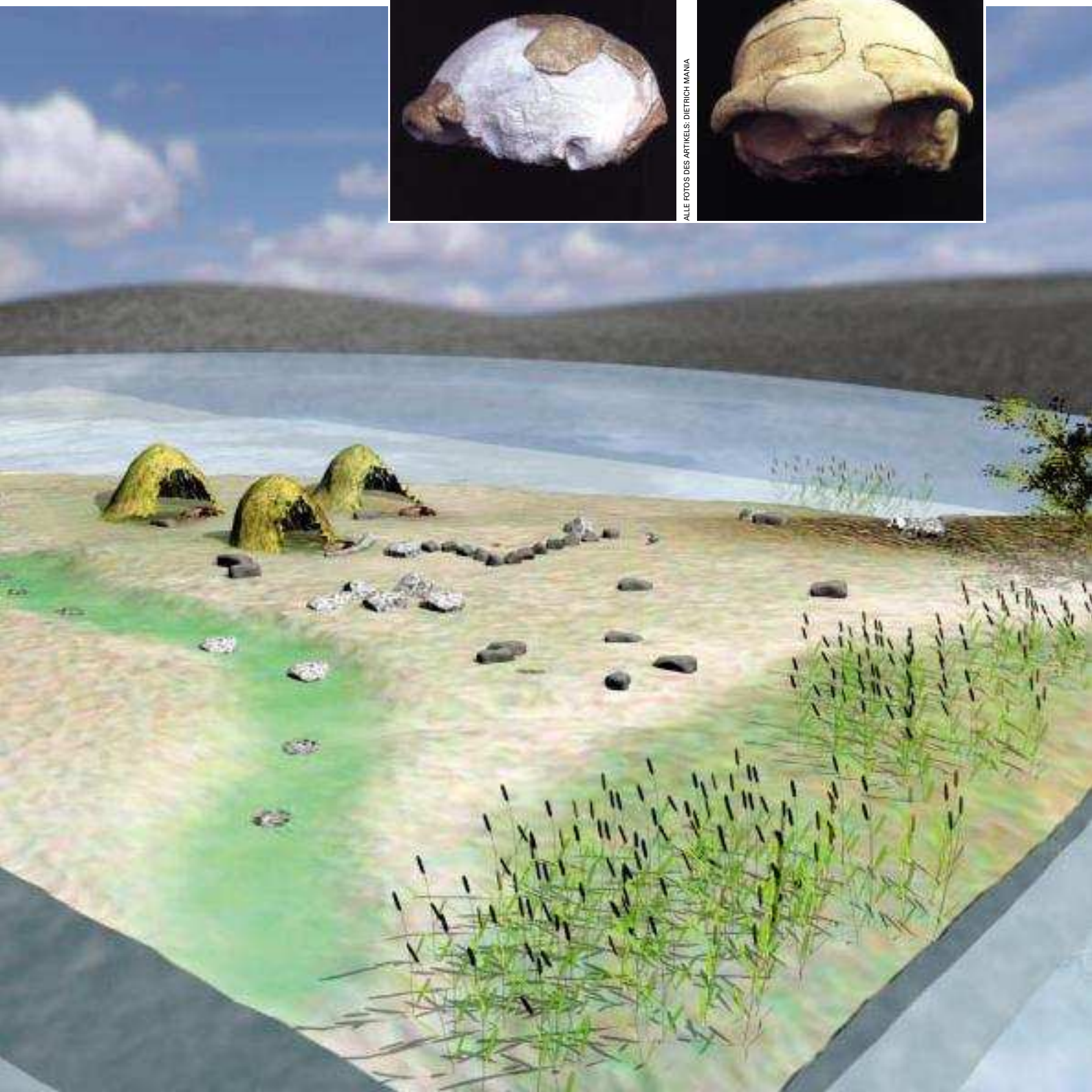
Blick in die Steinzeit: So etwa, nur dazu voller Müll, könnte das Lager bei Bilzingsleben vom Hang im Südwesten her ausgesehen haben. Dort gefundene menschliche Schädelfragmente fügen sich in bekannte Schädel des *Homo erectus* ein. Eine der Rekonstruktionen ist in Vorder- und Seitenansicht abgebildet.

Fundstück, ein großes Stirnbeinfragment, in Händen hielten, beschlich uns das Gefühl, wir würden dem Urmenschen in die Augen blicken. Insgesamt 28 Schädelstücke bargen wir sowie acht einzelne Zähne. Als Letztes fanden wir 1999 noch den rechten Ast eines Unterkiefers.

Emanuel Vlček, Paläoanthropologe vom Nationalmuseum in Prag, erkannte, dass die meisten Schädelfragmente offenbar von zwei Individuen stammen, der Unterkiefer aber von einer dritten Person. Wie seine Messungen und Vergleiche ergaben, passen die Fossilien zum Formenkreis des *Homo erectus*, der einst über Afrika und Eurasien verbreitet war. Besonders hoch erscheint die Ähnlichkeit mit dem Pekingmenschen und dem Javamenschen sowie mit dem Schädel OH9 aus der Olduvai-Schlucht in Tansania. In diese Rekonstruktionen lassen sich die Fragmente aus Bilzingsleben hervorragend einfügen.

Homo erectus bilzingslebenensis, wie Vlček diesen Menschen taufte, besaß bereits ein über tausend Kubikzentimeter großes Gehirn. Er trug einen lang gestreckten Schädel mit zeltartigem Querschnitt, leicht angedeutetem Scheitelkiel ▷

ALLE FOTOS DES ARTIKELS: DIETRICH MANIA



Über der Siedlung lagerte sich Travertin ab und bildete einen Bergsporn, die »Steinrinne«. Vor über dreißig Jahren fand der Autor hier erstmals Menschenfossilien. Das Foto entstand 1999.

▷ und abgewinkeltem Hinterhaupt sowie einem mächtigen Überaugenwulst quer über beiden Augen.

So selten menschliche Knochenfossilien aus jener Zeit sind – noch spektakulärer ist der Fundkomplex in seiner Gesamtheit. Er eröffnet uns einen tiefen, einmaligen Einblick in die Welt jener Frühmenschen. Ihre kleine Siedlung war in Wohn-, Arbeits- und andere Aktivitätsbereiche untergliedert. Sie fertigten für verschiedenste Zwecke Werkzeuge an, die sie – ebenso wie Abfall – in großer Menge hinterließen. Was davon aus Stein, Knochen oder Geweih bestand, überdauerte die Zeiten. Offensichtlich ging diese Menschengruppe auch Beschäftigungen mehr ideeller Natur nach. Solche Betätigung entsprang wahrscheinlich der Muße, vielleicht auch einer geistigen Auseinandersetzung mit Naturerscheinungen oder zwischenmenschlichem Erleben.

Das Anwesen lag geschützt an einem Bach am Südwestende eines nur wenige hundert Meter breiten Sees. Dort erstreckte sich die Siedlung über eine halbinselartig vorspringende Uferterrasse von etwa vierzig Meter Durchmesser. Nach Westen zu, wo eine Karstquelle den Bach speiste, ragte der Talhang über fünf Meter hoch auf. Darüber stieg eine Hochfläche sanft an. Nach Osten und Südosten begrenzte der Schilfgürtel des Sees die Terrasse. Im Westen und Norden fiel der Vorsprung in einer Böschung ab. Hier hatte der Bach im See einen breiten Schwemmfächer aufgeschüttet.

IN KÜRZE

- Der einmalige Fundplatz bei **Bilzingsleben** in Thüringen zeugt von einer Siedlung des ***Homo erectus*** vor rund 370 000 Jahren. Die Bewohner gliederten den Platz in verschiedene **Wohn- und Arbeitsbereiche**. Vielleicht besaßen sie sogar eine Art Kultstätte.
- Diese frühen Menschen lebten hauptsächlich von der **Großwildjagd**. Neben einer reichen Palette von Werkzeugen, Jagdwaffen und Knochenabfällen hinterließen sie **Knochen mit Ritzmustern**.
- Die Bewohner der Siedlung besaßen die **kulturellen und geistigen Voraussetzungen**, sich an wechselnde Klimabedingungen anzupassen. Damit zeichneten schon den *Homo erectus* Eigenschaften aus, die der *Homo sapiens* zur Perfektion weiterentwickelte.

Diesen Ort mussten die Bewohner nach einiger Zeit verlassen. Als der Seespiegel allmählich anstieg, vernässte das Gelände. Da suchte sich die Gruppe in der Nähe auf dem höheren Ufer einen neuen Siedlungsplatz. Dabei ließen die Bewohner zahllose Gerätschaften zurück, wie auch jede Menge Abfall, etwa zerschlagene Tierknochen. Kleinere Objekte wurden später vom Wasser umgelagert. Nur die großen und schweren Teile blieben dort liegen, wo die Menschen sie einst deponiert hatten. Diese Fundstücke lassen noch Siedlungsstrukturen erkennen und sie erlauben, Lebensgewohnheiten jener Bewohner zu rekonstruieren.

Der Platz gliedert sich in verschiedene Zonen. So sind im mittleren Bereich größere Steine und Knochen in drei diffusen, ovalen bis kreisförmigen Ringen von drei bis vier Meter Durchmesser angeordnet – mit einer Aussparung nach Südosten, zur windabgewandten Seite. Vor diesen Öffnungen entdeckten wir Spuren von Feuerstellen mitsamt einst-

mals erhitzten Geröllsteinen. Auch legten wir je zwei bis drei Arbeitsplätze frei, erkennbar an flachen Steinblöcken, die als Ambosse dienten. Daneben lagen Geröllgeräte, Produktionsabfälle und vor allem angehäufte Knochenreste, also Speiseabfälle.

Halbrund mit spezialisierten Werkstätten

Vermutlich standen hier damals drei Hütten. Vielleicht waren die Wände aus Ästen und Zweigen geflochten und am Grund mit den schweren Steinen und Knochen stabilisiert. An den Außenseiten deponierten die Bewohner größere Gerätschaften aus Knochen, Stein oder Geweih. Stangenförmige Holzreste zeugen auch von Holzgeräten. Vor den Eingängen der Hütten dürften die intimen Aufenthalts- und Arbeitsplätze der Bewohner mit zugehörigen Feuerstellen gelegen haben. Die Hitzespuren an den Geröllen rühren wahrscheinlich daher, dass die Leute mit heißen Steinen Lebensmittel dünsteten.

Vor den Hütten erstreckte sich im Halbkreis eine große, fünf bis acht Meter breite Zone mit etlichen Arbeitsplätzen. Diesen Bereich haben wir die Werkstattzone genannt. Dicht bei dicht lag das Fundmaterial dort. In diesem Bereich stellten die Bewohner vielerlei Gerätschaften her und benutzten sie auch. Sie fertigten und verwendeten hier sowohl Spezialgeräte aus Feuerstein als auch Werkzeuge aus Geröllen, Knochen und Geweih für gröbere Arbeiten.

Einige Arbeitsplätze scheinen speziell der Behandlung von Holz und vielleicht auch anderen organischen Materialien gedient zu haben. Erhalten sind davon Geräte zur Holzbearbeitung, unzählige später mit Kalk versinterte Holzreste – vermutlich Späne – sowie lange, stangenförmige Artefakte, die wir inzwischen für Lanzen oder Speere halten.

Ein dritter Arbeitsbereich, der sich in ganzer Länge des Terrassenufers mehrere Meter breit direkt am See entlangzog, diente vermutlich dem Zerlegen von Tieren. Darauf deuten die an dieser Stelle gefundenen Skelettreste hin. Andere Geräte lassen vermuten, dass die Menschen hier auch Arbeiten erledigten, für die sie Wasser benötigten. Zum Beispiel lagen nur hier große Schaber aus Knochen.

Abfälle aller Art, vor allem auch Tierknochen, landeten offensichtlich haufenweise im Wasser, präziser gesagt in dem breiten Schwemmfächer des Bachs, der sich während der Besiedlung entlang dem Seeufer bildete. Diese Abfallhalde war für uns eine reiche Fundgrube.

Eine weitere Werkstattzone, deren genaue Funktion wir noch nicht erschließen konnten, lag im südlichen Teil des Platzes, hin zum Röhrichtsaum des Sees. Mehrere Stellen dieser Fläche hatten die Leute mit Steinen gepflastert und darauf große Travertinblöcke deponiert. Diese dienten als Arbeitsunterlagen, wie ihre vom Gebrauch geglätteten Oberflächen zeigen. Neben den Blöcken liegen andere schwere Steine, die Spuren starker Hitzeeinwirkung tragen. Offensichtlich wurden die heißen Steinblöcke für besondere Arbeiten benötigt.

Am eigentümlichsten erscheint uns jedoch im südöstlichen Teil der Siedlung ein fast runder Platz von etwa neun Meter Durchmesser. Er ist dicht mit Steinen und flachen Knochenstücken gepflastert. Im Gegensatz zu den Werkplätzen wies er weder Abfall noch größere Geräte auf. Allerdings fanden wir Abdrücke und Reste von Holzartefakten, eine Abwurfstange von einem Rothirsch – sowie erstaunlicherweise mehrere menschliche Fossilien. Einige Steinplatten in der Mitte und ein Travertinblock am Rand tragen Brandrisse. Somit dürften dort Feuer entfacht worden sein.

Im westlichen Teil dieses sonst freien Platzes ragte ein Quarzitblock aus dem Pflaster, der als Amboss gedient hatte. Auf ihm wurden Knochen zerschlagen, wie zermalmte Partikel in den Narben seiner Oberfläche zeigen. Möglicherweise hatte der Amboss eine besondere Bedeutung. Er steckte zwischen den Hornenden eines in das Pflaster eingelassenen Wisentschädels. Auch kamen nahe bei dem Steinblock die auf diesem Platz gefundenen Menschenreste zu Tage. Von Westen her führte zum Platz eine gerade, fünf Meter lange Steinreihe aus großen Brocken. An deren Anfang und Ende gruben wir zwei Elefantenstoßzähne aus. Beide maßen je einen Meter achtzig. Wahrscheinlich standen sie einst aufrecht. ▷

Besonders reiches Fundmaterial lieferte die alte Uferzone. Das Foto rechts gibt davon einen Eindruck. Dort lagen zahlreiche Fossilien von großen Säugetieren – wie der Unterkiefer eines Waldelefanten hinten links. Auch ehemalige Arbeitsplätze und Werkzeuge sind zu sehen. Auf dem Bild unten wird gerade ein Nashornunterkiefer freigelegt.

▷ In den drei Hütten der Siedlung könnten unseres Erachtens zwanzig bis höchstens fünfundzwanzig Personen gewohnt haben. Die Gruppe lebte in einer Phase der mittleren Eiszeit, in der in Mitteleuropa ein wärmeres, trockeneres Klima herrschte als heute. Die Winter waren relativ mild mit teilweise auch frostigen Temperaturen, die Sommer trocken und ausgesprochen warm. Einen recht genauen Blick auf die damalige Vegetation erlauben die vielen Pflanzenfossilien, vor allem Abdrücke von Blättern und Früchten sowie die Pollenanalysen der Seesedimente.

Versierte Großwildjäger

In der Umgebung von Bilzingsleben herrschten damals lichte, trockene Eichen-Buchsbaumwälder vor. Sie lösten sich mit Gebüschfluren und Steppenwiesen ab. Einige Baum- und Straucharten dieser Floren – wie Buchsbaum, Feuerdorn, Zürgelbaum, Köröser Flieder und Weinrebe – wachsen heute natürlicherweise nicht mehr in Mitteleuropa, sondern im nördlichen und östlichen Mittelmeergebiet. Andere, wie das Strauchfingerkraut, haben ihren Verbreitungsschwerpunkt in Südosteuropa und Westasien.

Diese abwechslungsreiche, teils bewaldete, teils offene Landschaft bot einer artenreichen Tierwelt ausreichend Nahrung. Das waren vor allem die Rudel und Herden bildenden Huftiere, also große und mittelgroße Pflanzenfresser wie Elefanten, Nashörner, Wildrinder, Wildpferde und verschiedene Hirsche. Nicht nur Raubtiere wie Löwe, Bär, Hyänen und Wolf stellten den Huftieren nach. Auch die Bewohner des Lagers bei Bilzingsleben jagten bevorzugt diese Pflanzen fressenden Arten. Sie bildeten seine Hauptnahrung, auf die er seine Existenz weit gehend begründete. Tonnenweise gruben wir an dem ehemaligen Siedlungsplatz zerschlagene Knochen und Gebisse von Säugetieren aus. Am meisten hatte die Menschengruppe Wald- und Steppennashörner sowie Hirsche erlegt, sehr viel auch Wildrinder, Wildpferde und Bären. An Waldelefanten tötete sie überwiegend Kälber.

Das Großwild machte, nach Tieren gezählt, sechzig Prozent der Jagdbeute aus. Offensichtlich lohnte in der Gemeinschaft die Pirsch auf ausgesprochen große Tiere mehr als die auf kleinere Arten. Auf mittelgroßes Wild, vor allem Hirsche, entfiel zwanzig Prozent der Beute. An Niederwild erlegte die Gruppe auffallend viele Biber, selten aber Rehe, Wölfe, Füchse, Dachse und Wildkatzen, die zu jagen sich wohl nicht lohnte. Auch Wildschweine und Löwen, die dem Jäger sehr gefährlich werden können, scheinen diese Menschen kaum erlegt zu haben.

Seit den sensationellen Speerfunden von Schöningen in Südostniedersachsen am Nordrand des Harzes wissen wir, dass sich der europäische *Homo erectus* jener Zeit auf die Jagd größerer Tiere mit Speeren, Wurfhölzern und sicher auch Stoßlanzen verstand. Der Schöninger Fundhorizont liegt in Luftlinie nur hundert Kilometer von Bilzingsleben entfernt. Er geht auf einen Jagdplatz zurück. Hier fand das Team um Hartmut Thieme vom Niedersächsischen Landesamt für Denkmalpflege in Hannover seit 1994 bislang acht schlanke, rund zwei Meter lange Wurfspeere aus hartem Fichtenholz. Nach heutigen Maßstäben funktionierten sie perfekt. An einem See inmitten einer sumpfigen Niederung hatten jene Jäger damit eine Herde Wildpferde erlegt. Nachgearbeitete Holzspeere wiesen ausgezeichnete Wurf- und Treffeigenschaften auf. Mit solchen Waffen ließ sich auf zwanzig oder dreißig Meter Entfernung selbst größeres Wild töten (siehe Interview S. 48).

In Bilzingsleben entdeckten wir längliche, dünne Artefakte aus Holz, über deren Funktion wir zunächst rätselten. Einzelne der Stangen waren mehr als zwei Meter lang. Heute sind wir uns si-

Die Steinzeitmenschen benutzten vielfältigste Werkzeuge. Oben von links: Schaber aus einem Stoßzahn mit Bearbeitungsspuren an der Arbeitskante; Messer aus Feuerstein; Kratzer aus Feuerstein zur Holzbearbeitung – sie fanden sich zu Tausenden; faustkeilartig zugerichteter Knochen für grobe Arbeiten. Rechts ein Arbeitsplatz mit einem Amboss, auf dem die Menschen von einem Oberarmknochen eines Waldelefanten das Gelenk (vorn) abgeschlagen hatten.

cher, dass es sich ebenfalls um Jagdspeere oder um Stoßlanzen handelt. Andere dieser Holzartefakte könnten Wirbelhölzer gewesen sein, mit denen man etwa Vögel oder kleineres Wild erlegte.

Mit Sicherheit haben sich die frühen Menschen von Bilzingsleben nicht nur von Fleisch und Fett ernährt. Zwar fanden wir in dem Lager nur ein paar Schalenstücke von großen Flussmuscheln und Vogeleiern sowie Kalzitausfüllungen von Kirschkernen. Doch ist anzunehmen, dass diese Menschen vielerlei Pflanzenprodukte zu sammeln und zu nutzen wussten. Sicherlich ernteten sie Nüsse, Eicheln, Beeren, Pilze, junge Sprosse und Salate. Anderes bleibt spekulativ. Wussten sie schon, dass Kirschharz oder Birkensaft viel Zucker enthalten? Oder dass der Samenmantel von Eibensamen Durst stillt und, im Gegensatz zu den anderen Teilen des Baumes, ungiftig ist? Wahrscheinlich ist zumindest, dass die Frühmenschen auch mit medizinischen Eigenschaften vieler Pflanzen vertraut waren.

Zweifelsfrei kannten sich diese Menschen mit den mechanischen und den Wuchseigenschaften der einzelnen Holzpflanzen ihrer Umwelt bestens aus. Ohne ein fundiertes Wissen darüber hätten sie niemals einen zwei oder zweieinhalb Meter langen Wurfspeer anfertigen können – eine Jagdwaffe, die unterhalb der Mitte etwa fünf Zentimeter dick war, sich leicht und treffsicher einige Dutzend Meter weit werfen ließ und in das Jagdopfer mehrere Handbreit tief eindrang.

Trugen die Frühmenschen schon Kleidung?

Für solche Speere nutzte der Frühmensch von Schöningen junge Fichten mit besonders hartem Holz. Die fand er an trockenen Standorten. Dort wachsen Bäume nur sehr langsam und bilden darum ganz enge Jahresringe aus. Damit der Stamm einen Speer von anderthalbfacher Mannshöhe ergab, musste er in Bodennähe eine gute Handspanne Durchmesser haben.

Mit einem schweren Hackmesser, zum Beispiel aus Quarzit, ließ sich der Baum fällen und entästen. Damit konnte man auch schon grob die Proportionen herausschlagen. Das Weitere war Feinarbeit, die anderes Werkzeug erforderte, nämlich sägezähnige und gebuchtete Feuersteingeräte. Mit denen hobelten und schliffen die Frühmenschen die Projektilform, die Spitzen und den glatten, dünnen Schaft (siehe Bild S. 50 im folgenden Interview).

Was Werkzeuge und andere Gebrauchsgegenstände – soweit wir diese denn kennen – betrifft, waren die Bewohner von Bilzingsleben Profis. Sie unterschieden zum Beispiel Gesteinsarten nach deren Nutzungseigenschaften und verwendeten auch Knochen, Geweihe, Zahnbein und Holz. Zweifellos verwerteten sie auch andere organische Materialien, die sich aber nicht erhalten haben.

Für grobe Arbeiten – wie Hacken, Schlagen, Spalten, Zertrümmern – nahmen die Frühmenschen zähe Gesteinsar- ▷

ten, die nicht leicht zersprangen. Dazu bot die weitere Umgebung des Lagers Gerölle und Schuttbrocken aus Muschelkalk, Travertin, Quarzit und Kristallin. Mit entsprechenden schweren Schlagsteinen zertrümmerte man Knochen oder schlug große Geröllgeräte passend zurecht. Zur Feinbearbeitung von Feuerstein wurden dagegen fast nur kleine, höchstens sechs Zentimeter lange Schlagsteine aus Quarzgeröllen verwendet.

Für steinerne Schaber, Messer oder Bohrer, also kleines handliches Spezialwerkzeug, brauchte man ein hartes, sprödes Gestein, das scharfkantig splitterte. Das ideale Material hierfür gab der baltische Feuerstein ab, den eiszeitliche Gletscher nach Thüringen transportiert hatten. Abgesehen von Messern, die gut in der Hand lagen, waren die meisten Feuersteingeräte erstaunlich klein. Einige maßen nur ein oder zwei Zentimeter.

Ein charakteristisches, auffallendes Feingerät ist der Bohrer, von dem es mehrere Typen gab. Die vielen gefundenen Bohrer – manche mit einem herausgearbeiteten Griff – bedeuten vermutlich, dass mit ihnen organische Materialien hergerichtet wurden, etwa Holz, Bast oder vielleicht auch Felle und Häute. Benutzten die Bewohner solches Spezialwerkzeug, um etwa Behältnisse, Tragen, vielleicht sogar einfache Kleidung anzufertigen? Zumindest im Winter liefen sie vermutlich nicht nackt herum. Allerdings reagiert menschliche Haut auf ungegerbte Felle und Häute mit schlimmen Ekzemen. Kannten diese Frühmenschen schon einfache Gerbverfahren?

Die Menschengruppe, die vor 370 000 Jahren in Thüringen an einem See siedelte, gehörte zur Art *Homo erectus*, die damals schon lange in Eurasien verbreitet war.

Geschützt vor Hyänen

Auch Knochen fanden als Werkzeugmaterial oft Verwendung. Aus den harten Bereichen der langen Extremitätenknochen von Elefanten entstanden lange Späne oder handliche Stücke, aus denen die Menschen eine Palette von Spezialgeräten fertigten: verschieden große Schaber mit retuschierten Kanten, Hiebgeräte mit Schneiden und Spitzen, Meißel, Keile, faustkeilartig retuschierte und dolchartige Geräte, Pfrieme und Spitzen. Sehr große Knochen, auch die Schulterblätter und Beckenschaufeln von Elefanten und Nashörnern, wurden zu Arbeitsunterlagen weiterverarbeitet. Diese tragen meist Gebrauchsspuren, wie Schrammen, Kratzer, Schnitte, Aussplitterungen, Hiebmarken, Glättungen oder Polituren.

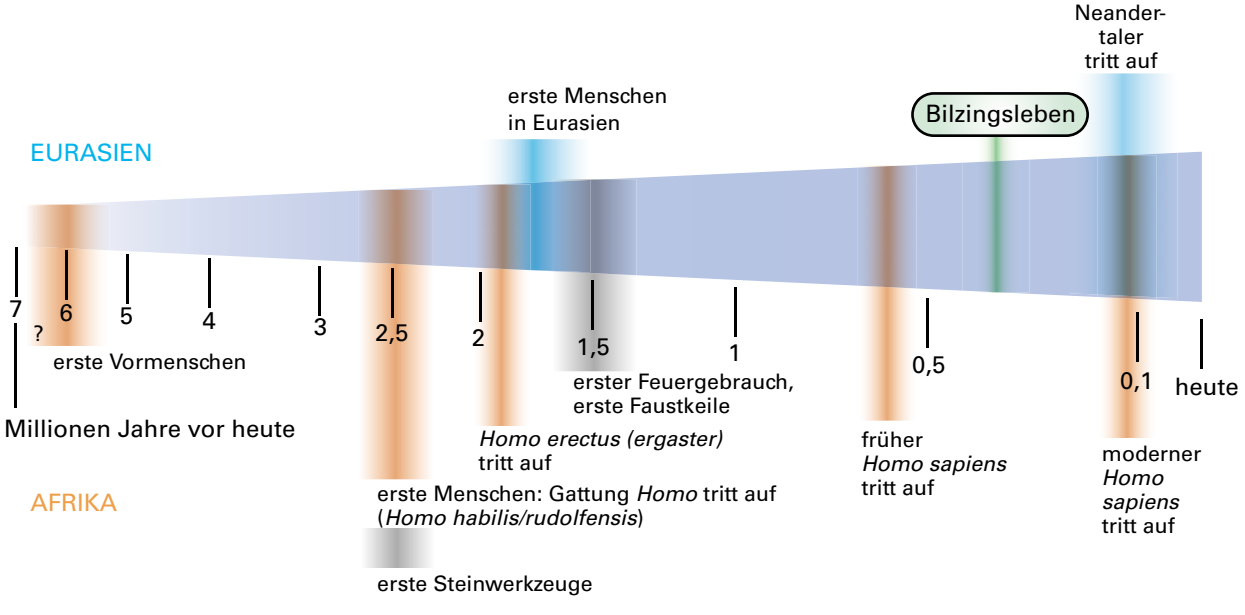
Holz ist an der Bilzingslebener Fundstelle teilweise in versintertem oder kalzifiziertem Zustand erhalten. Meist handelt es sich um Abfälle, doch auch etliche Artefakte tauchten auf, darunter die erwähnten Jagdwaffen. Manche Objekte aus Holz tragen Ösen- oder Hakenenden. Andere sind schaufelförmig oder flach spatelartig geformt.

Von Menschen, die Werkstoffeigenschaften von Steinen, Knochen und Geweihen so hochgradig funktional beurteilen konnten, ist zu erwarten, dass sie auch Ruten zu binden oder Bast zu flechten verstanden. Wir haben zumindest versucht, mit den Mitteln jener Zeit eine einfache Hütte aus Weiden und Gras zu bauen – was sich als nicht besonders schwierig erwies.

Die verwendeten bis zu fünf Meter hohen Schösslinge fällten wir mit Hackmessern. Alles andere machten wir ohne Werkzeug. Die bienenkorbartige Konstruktion deckten wir dachziegelartig mit Grasbüscheln, die wir mit Weidenruten befestigten. Drei Personen brauchten für diese Arbeit keine vier Stunden. Mehr als ein Jahr lang hielt unsere Hütte Wind und Wetter stand und blieb innen trocken und warm.

Offensichtlich war das Lager von Bilzingsleben dauerhaft über mehrere Jahre bewohnt. Schon die Mengen der entdeckten Tierknochen sprechen dafür. Auffälligerweise tragen sie fast keine Verbissspuren von großen Raubtieren – vor allem nicht einmal von in der damaligen Tierwelt immer präsenten Hyänen. Anscheinend gelang es den Menschen, Raubtiere von ihrem Lager fern zu halten. Das bedeutet, dass stets Personen anwesend gewesen sein müssen.

Hier hatte sich der *Homo erectus* eine eigene Umwelt geschaffen, die vor Zwängen und Gefahren der Natur einigermaßen schützte. Solch eine abgeschirmte Siedlung bot viele Vorteile. Beispielsweise konnten Teilgruppen zur Jagd oder zum Sammeln losziehen, während andere Gruppenmitglieder im Lager zurückblie-



SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Von Feuergebrauch zeugen viele Spuren auf dem Gelände. Hier eine der freigelegten Feuerstellen mit einem verkohlten Ast.

ben. Das betraf etwa Mütter mit kleinen Kindern, Ältere und Kranke. Allein diese unterschiedlichen Aufgaben und persönlichen Voraussetzungen vertieften eine Arbeitsteilung, die schon biologisch und geschlechtlich vorgegeben war.

Tageswanderungen, bei denen die Menschen auch Last zurückzuschleppen hatten, dürften sich in der Regel höchstens zehn Kilometer im Umkreis des Lagers erstreckt haben. Dort, in dieser mannigfaltigen, pflanzen- und tierreichen Landschaft, bot sich der Gruppe praktisch alles, was sie zum Leben brauchte. Anzunehmen sind aber auch weitere Reisen, die Tage, Wochen oder länger dauerten und bis an die Mittelgebirge oder die großen Flüsse im Norden führten. Plausibel ist, dass die Wanderer dann zeitweise in kleineren Lagern hausten, ähnlich etwa dem altpaläolithischen Jagdplatz bei Schöningen.

Die Siedlung bei Bilzingsleben wäre somit ihr zentraler Wohnort, sozusagen ihr Basislager gewesen. Hier konnten die Bewohner Dinge tun, für die auf den Streifzügen wenig Zeit oder Gelegenheit bestand. Vielleicht hatten sie hier Muße und Konzentration für kompliziertes Handwerk. Selbstverständlich nutzten sie auch die Zeit, um Wissen weiterzuvermitteln. Und wahrscheinlich konnten sie experimentieren – etwa andere Werkstoffe erproben und neue Geräte oder alltägliche Gebrauchsgüter erfinden. Da bedeutete die Beherrschung des Feuers, das der Mensch längst zu nutzen wusste, nicht nur einen technischen Vorteil. Denn eine Feuerstelle spendete Licht und Wärme, bildete somit auch einen sozialen Mittelpunkt.

Geistige Beweglichkeit

Über den Grad der geistigen Entwicklung dieser Menschen können wir nur anhand der materiellen Funde spekulieren. Mehr als andere Orte gibt die Siedlung bei Bilzingsleben darüber Aufschluss, wie sich Menschengruppen im mittleren Eiszeitalter in ihrer Umwelt einrichteten. Deutlich ist zu erkennen, dass sie den Herausforderungen mit anspruchsvollen, oft bereits recht komplexen Handlungen begegneten.

Viele Artefakte, die wir ausgruben, waren offensichtlich in wenigen Handgriffen für den schnellen Gebrauch gefertigt. Andere Geräte erforderten hohen Aufwand und viel Arbeitszeit. Nur bei genauer Planung der Arbeitsschritte mit einer Vorstellung vom Endergebnis ließen sie sich herstellen.

Das gilt unter anderem für die zahlreichen Gebrauchsgegenstände, zu deren Produktion extra angefertigtes Handwerkszeug nötig war. Wurfspeere sind nur ein Beispiel von vielen. Genaue Planung erforderten etwa die großen Geräte aus Extremitätenknochen von Elefanten. Bearbeiten ließ sich dieses Material praktisch erst im entfetteten Zustand, wenn die Kadaver skelettiert waren. Die Skelette könnten die Frühmenschen an Orten gefunden haben, wohin sich sieche Elefanten zum Sterben zurückzogen. Den Anzeichen nach schlugen die Menschen von den Extremitätenknochen die Gelenkenden ab und spalteten die Knochenschäfte, indem sie Keile hineintrieben. Sie mussten aber auch die poröse innere Masse entfernen. Erst die fast steinharten Spaltstücke bearbeiteten sie weiter zu Geräten.

Insbesondere die Großwildjagd, Existenzbasis dieser Menschen, stellte hohe Anforderungen an geistige Beweglichkeit, Reaktionsvermögen und soziale Kommunikation. Erfolg hatten die Jäger dabei nur, wenn sie die Tiere und ihr Verhalten in den einzelnen Jahreszeiten genauestens kannten. Sie brauchten präzise Ortskenntnis, mussten Situationen blitzschnell verstehen und sich untereinander rasch verständigen können.

Hermann Rieder von der Universität Heidelberg bewertete die zu solcher Jagd erforderlichen physischen und geistigen Eigenschaften aus Sicht des Sportwissenschaftlers. Geschulte Speerwerfer ließ er Speere testen, die denen von Schöningen nachempfunden waren. Beim effektiven Wurf, so Rieder, zählen koordinative und konditionelle Fähigkeiten wie Geschicklichkeit, Reaktionsvermögen, Timing, Kraft, Schnelligkeit und Ausdauer. Eine sinnvolle Kombination dieser Parameter erforderte vom Frühmenschen ▷

Wie die damalige Vegetation aussah, verraten Pflanzenspuren – wie diese Blätter vom Feuerdorn.

▷ nacheinander Wahrnehmen, Denken, Planen und Entscheiden. Darüber hinaus seien – wie heute beim Sport – auf der Jagd die schnellsten Reaktionen unbewusst automatisch erfolgt. Möglicherweise reflektierten die Jäger hinterher das Geschehene.

Abstraktes Denken

Wie viele Forscher heute nehmen wir an, dass gerade gemeinschaftliche Jagdzüge und brisante Situationen, denen jene Menschen dabei begegneten, das Denken und damit ihre geistige Entwicklung herausforderten – also die menschliche Evolution vorantrieben. Ähnlich fördernd wirkte das soziale Leben selbst. Soweit sich abzeichnet, war der Frühmensch dafür gewappnet, neue Umweltverhältnisse zu bewältigen. Er besaß somit Voraussetzungen, um sich an kältere, ungünstigere Klimata anzupassen. Zum Beispiel fällt das Jagdlager von Schöningen in eine etwas jüngere, kühlere Phase. Die dort agierenden Jäger hatten eine ganze Wildpferdherde zur Strecke gebracht und offensichtlich dann Berge von Fleischvorräten weggeschafft.

Neben den Jagdwaffen und Werkzeugen des Frühmenschen von Bilzingsleben machen insbesondere auch einige Objekte staunen, die wahrscheinlich wenig unmittelbaren praktischen Nutzen hatten. Der dortige Fundhorizont lieferte einige auffällige Knochenartefakte mit eingeritzten Strichgruppen auf der Oberfläche. Offensichtlich entstanden diese Ritzungen nicht zufällig bei der Arbeit, sondern wurden absichtlich eingraviert. Uns dienen diese Objekte als Hinweis darauf, dass sich die Bewohner geistig auch mit anderen Dingen als mit ihrem Alltag beschäftigten.

Vor allen anderen zeigt das ein vierzig Zentimeter langes Gerät aus einem Knochenschaft vom Elefanten (unten). Es trägt eine aufgefächerte Strichfolge. Sie beginnt an dessen spitzem Ende mit einem aufgespreizten Bündel aus sieben Linien. Dann folgt eine etwa 15 Zentimeter lange Gruppe von 14 aufgefächerten Linien. Das andere Ende ist ausgesplittert. Möglicherweise befand sich hier, symmetrisch zum vorhandenen Ende, ein weiteres Strichbündel aus sieben Gravuren.

Auch wenn das nicht der Fall gewesen sein sollte – wir deuten dieses Strichmuster, wie auch mehrere andere, als die grafische Wiedergabe einer gedanklichen Vorstellung. Manche unserer Fachkollegen spekulieren, die 21 – vielleicht ursprünglich 28 – nach der Zahl Sieben gruppierten Linien könnten einen Mondkalender darstellen. Wie auch immer – uns selbst ist die Erkenntnis wichtiger, dass jene Menschen abstrakt denken konnten. Hiervon zeugt deutlich ihr planvolles Verhalten, wenn sie Spezialgeräte fertigten. Der Frühmensch, der jenes Muster ritzte, legte in die zusammen angeordneten Striche einen Symbolgehalt. Es handelt sich um das älteste uns bekannte kulturelle Objekt dieser Art. Da sich abstrakte Gedankengänge nur mit Wortsymbolen mitteilen lassen, liefern die eingravierten Strichmuster auch einen Hinweis darauf, dass diese Menschen eine Sprache hatten.

In seiner kulturgeschichtlichen Bedeutung steht der eigentümliche gepflasterte Platz des Bilzingslebener Basislagers den gravierten Knochenartefakten zur Seite (Foto rechts). Seine Funktion können wir uns noch nicht endgültig erklären. Offensichtlich nahm dieser Ort im Alltagsleben der Gruppe eine herausragende Stellung ein. Man hat den Eindruck, dass die Frühmenschen das neun Meter breite Rund deshalb pflasterten, damit jedem deutlich war, dass hier keine Alltagsarbeiten stattfinden und Abfälle liegen bleiben durften.

Auffälligerweise fanden sich gerade dort ein paar der menschlichen Fossilien: ein Unterkieferfragment, einzelne Zähne sowie wenige überraschend kleine Bruchstücke von zwei Schädeln. Diese Fossilien entdeckten wir alle nah bei dem Amboss im westlichen Bereich der Rundung. Mehr Fragmente des einen Schädels, die zu Ersteren genau passen, lagen in einer Rinne des Schwemmfächers. Und weitere Stücke des anderen gruben wir im Bach südwestlich des Lagers aus.

Anzeichen für Kulthandlungen

Demnach könnten die Bewohner mit diesen Schädeln auf dem Pflasterplatz eine besondere Handlung vollzogen haben. Emanuel Vlček vermutet, dass die Schädel erst zerschlagen wurden, als sie schon skelettiert waren. Die Menschen bearbeiteten sie auf dem Steinblock und sammelten die Bruckstücke dann ein, um sie an anderer Stelle zu deponieren. Einige der größeren Schädelfragmente im Schwemmfächer und in der Bachrinne lagen so, als wären sie dort absichtlich sorgsam niedergelegt worden. Vielleicht hatte man beim Aufsammeln der Fragmente auf dem gepflasterten Platz ein paar kleinere Teile übersehen.

Demnach würden die zerschlagenen Schädel nicht von Kannibalismus zeugen, wie einige unserer Kollegen zunächst mutmaßten. Vielmehr könnten diese Frühmenschen auf dem Pflasterplatz an verstorbenen Gruppenmitgliedern einen postmortalen Schädelkult ausgeübt haben. Das würde bedeuten: Dieser Ort hatte eine besondere kulturelle Bedeutung und diente ideellen Handlungen.

Vielleicht können wir solche Aktionen bereits als frührituell bezeichnen. Sie erforderten einen ruhigen Ort, abgesondert von den Alltagszwängen. Dergleichen Riten sind wichtig, um sozial not-

Die Frühmenschen hinterließen einige Knochenstücke mit offensichtlich eingeritzten Mustern. Hier ein Gerät aus einem Knochenschaft vom Elefanten mit einer gebündelten (links) und einer aufgefächerten Strichfolge.

UNTEN: SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Rätselhaft erscheint ein mit Steinen und Knochenstücken gepflasterter Platz im Südosten der Ansiedlung (siehe Grafik rechts, Vordergrund). Auf ihm lag – im Gegensatz zu den anderen Bereichen des Geländes – fast kein Müll herum. Offenbar diente der Platz rituellen Handlungen. (Einen virtuellen Flug über das Lager zeigt ein Kurzfilm, den Sie unter www.spektrum.de im Online-Inhaltsverzeichnis dieses Hefts finden.)

wendiges Wissen im Kollektiv weiterzugeben. Möglicherweise handelt es sich im beschriebenen Fall um den frühesten Nachweis von ideellen Handlungen in der menschlichen kulturellen Evolution.

Abwegig ist die Schlussfolgerung keineswegs. Der Mensch jener Zeit konnte zielstrebig und planvoll handeln sowie abstrakt denken. Er verstand sich darauf, Speere mit praktisch perfekten Wurfeigenschaften herzustellen. Auch verfügte er über eine Sprache. Selbst wenn das alles noch relativ frühe Entwicklungsstadien waren – es bedeutet, dass sich der Frühmensch eine eigene künstliche Umwelt schuf. Wer aber dazu fähig ist, der hat auch schon ein einfaches Weltbild: Er beginnt, nach Erklärungen für lebenswichtige Phänomene seiner Naturumwelt zu suchen. Selbstverständlich besaßen diese sozio-kulturellen Errungenschaften hohen Auslesewert für die weitere menschliche Evolution.

Im Jahre 2002 mussten die Grabungen in Bilzingsleben vorläufig eingestellt werden. Es wird mit Sicherheit lohnen, sie weiterzuführen. Auch die weitere Auswertung der schon geborgenen Funde sowie die Diskussion darüber sind lange noch nicht abgeschlossen.

Schon heute steht dennoch fest, dass wir die frühen Menschen des mittleren Eiszeitalters unterschätzt haben. Sie führten offenbar bereits ein reich gestaltetes, aufwändiges kulturelles Leben. Sie verstanden es, sich in ihrer Umwelt nicht nur materiell, sondern zumindest ansatzweise wohl auch geistig einzurichten. Auf diese Kultur waren sie umgekehrt auch angewiesen. Mit der kleinen Siedlung von Bilzingsleben, geschützt an einem See gelegen, schufen sie sich einen abgeschirmten sozialen und kulturellen Raum zum Wohnen und Arbeiten – und wahrscheinlich auch für einfache ideelle Handlungen.

Die geistige Auseinandersetzung dieser Frühmenschen mit ihrer Welt mag bescheiden wirken. Verleugnen lässt sie sich unseres Erachtens nicht. Die Gedanken dieses *Homo erectus* reichten offensichtlich über die notwendigsten alltäglichen Verrichtungen der Existenzsicherung hinaus. Ohne begriffliches Denken und somit auch Sprache ist eine Lebensführung wie in dem steinzeitlichen Lager bei Bilzingsleben nicht vorstellbar.

Nicht erst der *Homo sapiens*, das haben uns über drei Jahrzehnte Grabungen in Thüringen gezeigt, erfand die menschliche Kultur, symbolisches Denken, planvolles Handeln und Sprache. Die Grundsteine dazu hatte der *Homo erectus* längst gelegt. Er besaß Fähigkeiten, sich mit Hilfe kultureller Errungenschaften an verschiedenartige Umwelten anzupassen. Hierauf konnten die moderneren Menschen aufbauen. ◁

Dietrich Mania ist Geologe, Paläontologe und Archäologe. Er hatte bis 2003 eine Professur an der Universität Jena inne. Über dreißig Jahre lang leitete er die Ausgrabungen des Projekts: »Bilzingsleben – *Homo erectus*, seine Kultur und Umwelt«.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Der Urmensch von Bilzingsleben. Von Ursula Mania. Artern, 2002

Der fossile Mensch von Bilzingsleben (The fossil man of Bilzingsleben). Von Emanuel Vlcek, Dietrich Mania und Ursula Mania. Verlag Archäologische Fachliteratur. Langenweißbach 2002

Die ersten Menschen in Europa. Von Dietrich Mania. Sonderheft zu: Archäologie in Deutschland, 1998

Auf den Spuren des Urmenschen – Die Funde der Steinrinne bei Bilzingsleben. Von Dietrich Mania. Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, und Theiss-Verlag, Stuttgart, 1990

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

INTERVIEW

»Das Jagdverhalten unterschied sich im Grunde nicht von dem einer *Homo-sapiens*-Gruppe vor 20 000 Jahren«

NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR DENKMALPFLEGE; PETER PFARR

Hartmut Thieme entdeckte 1994 im nördlichen Harzvorland einen altpaläolithischen Jagdplatz aus einer ausgehenden Warmzeit vor rund 400 000 Jahren. Sensationen sind die – bislang acht – hölzernen Wurfspeere, die er in der Fundschicht ausgrub. Mit diesen Jagdwaffen streckte ein *Homo-erectus*-Trupp an einem See eine Wildpferdherde nieder. Der Fund widerlegt die Lehrmeinung insbesondere amerikanischer und englischer Paläoanthropologen, der frühe Mensch sei im Wesentlichen nur Aasesser gewesen.

Spektrum der Wissenschaft: Was macht den Fundort Schöningen so einzigartig?

Dr. Hartmut Thieme: Schöningen liefert erstmals eine Serie qualitätvoll bearbeiteter, exzellent erhaltener Holzgeräte aus der Frühzeit des Menschen, noch dazu sehr verschiedenartige. Dies erhellt ganz wesentlich die frühe menschliche Kulturgeschichte. Auch ist es eine der ältesten Fundstellen Europas. Am meisten überraschte, dass Menschen so früh technisch ausgefeilte Wurfspeere benutzten. Schöningen beweist, dass der Mensch schon damals systematisch Großwildjagden durchführte. Die ausgegrabene Fläche umfasst inzwischen mehr als 3000 Quadratmeter an einem Seeufer, wo ein Jagdtrupp einer Wildpferdherde auflauerte und sie zur Strecke brachte. Anschließend wurden die Tiere dort auch zerlegt, in einer Schlachtzone von gut fünfzig Meter Länge und etwa zehn Meter Breite.

Spektrum: Wie muss man sich eine Großwildjagd in der Urzeit vorstellen?

Thieme: Zunächst ein jüngeres Beispiel: Neandertaler haben hier in der Region vor 120 000 Jahren einem Waldelefanten eine 2,40 Meter lange Eibenholzlanze zwischen die Rippen gestoßen – neben einer Lanzenspitze von Clacton in England die bis dahin einzige Holzlanze aus der Altsteinzeit. Das Tier sank dann an einem Seeufer ein und verendete. Sein Skelett wurde 1948 bei Lehringen nahe Verden entdeckt. Die Jäger müssen sich an den Elefanten herangeschlichen und versucht haben, ihn ins Herz zu treffen.

Die Jagdstation von Schöningen verrät viel komplexere Strategien. Die Jäger dort erlegten vor 400 000 Jahren eine ganze Wildpferdherde, und zwar mit Wurfspeeren am Rand eines Sees. Wir fanden die Skelettreste von mindestens zwanzig Tieren – Hengst, Stuten, Jungtiere – und dabei die Waffen. Diese Speere funktionierten wie heutige Wettkampfspeere, sahen in der Form auch fast genauso aus. Sie waren schlank, hatten den Schwerpunkt im vorderen Drittel und flogen sehr weit. Es waren also Distanzwaffen für schnelles, flüchtiges Herdenwild.

Spektrum: Wie konnte man mit den primitiven Mitteln der Zeit so einen Speer herstellen?

Thieme: So primitiv waren die Mittel gar nicht! Der Mensch besaß bereits ein Spektrum von Präzisionswerkzeugen. Für einen Speer mussten die Jäger einen geeigneten Baum suchen. Sie fällten ihn wahrscheinlich mit großen Hackgeräten – Fichten waren in dem kühlen Klima damals härter. Dann wurde er entrindet, entastet und schließlich die Spitze aus der harten Basis des Stammes auf mehr als sechzig Zentimeter Länge völlig symmetrisch herausgearbeitet.

Spektrum: Mit Speer und Lanze auf Großwildjagd – das war sicherlich nicht ungefährlich?

Thieme: Besonders riskant war natürlich die Jagd auf Elefanten – in Warmzeiten auf Waldelefanten, in kühleren auf Mammute. Viele Skelettreste von Menschen aus der Altsteinzeit weisen Verletzungsspuren auf. Weniger gefährlich war sicherlich die Jagd auf Pferde, also Fluchttiere, die gewöhnlich nicht angreifen.

Spektrum: Wie haben die urzeitlichen Jäger ihre Beutetiere gefunden? Stöberten sie das Wild eher zufällig auf? Oder legten sie sich auf die Lauer?

Thieme: Das war je nach Landschaft und auch Beuteart verschieden. Alle Tiere haben eigene Verhaltensmuster. Die Menschen, die damals als Wildbeuter durch eine Gegend wie das Nordharzvorland zogen, hatten einen enormen Kenntnisstand über deren Verhalten – wie und wann Rentiere ziehen, wie Elefanten sich bewegen, wo Wildpferdherden sich aufhalten. Hinzu kommen die Jahreszeiten: Ist es ein trockener, heißer Sommer oder ein schneereicher Winter? Die Jäger beobachteten die gesamte Natur und richteten ihr Verhalten kenntnisreich speziell darauf aus, mit möglichst geringem ökonomischem Aufwand an Nahrung zu kommen.

Spektrum: Wie konnten sie aber eine ganze Wildpferdherde überwältigen?

Thieme: Die Menschen wussten seit Jahrtausenden, wie Pferdeherden an solchen Seeufern entlangziehen, etwa zur Tränke. Und sie wussten, dass die Fluchtmöglichkeiten an derartigen natürlichen Hindernissen eingeschränkt waren. Das nutzten sie natürlich aus.

Nashörner – die damals auch hier lebten – zu jagen, war dagegen schwierig und mordsgefährlich. Vielleicht hat man auch schon Fallgruben gebaut. Zweifel-

Der Archäologe Hartmut Thieme arbeitet am Niedersächsischen Landesamt für Denkmalpflege in Hannover. Seit 1983 leitet er die archäologische Erschließung eines Braunkohlentagebaus in Schöningen bei Helmstedt, der in Luftlinie nur hundert Kilometer von Bilzingsleben entfernt ist und einzigartige Zeugnisse der frühen Menschheitsgeschichte birgt – so diesen 2,25 Meter langen Speer.

los kannten die Jäger die Wildwechsel, die kreuz und quer durch die Landschaft liefen. Und sie haben sich auf die Verhaltensmuster der Tiere und auf deren Wehrhaftigkeit eingestellt.

Spektrum: Das würden Sie einem *Homo erectus* vor 400 000 Jahren zutrauen?

Thieme: Ja, schließlich hatten wir selbst da schon mehr als zwei Millionen Jahre Entwicklungsgeschichte auf dem Buckel und damit einen riesigen Erfahrungsschatz gespeichert. Wir müssen doch davon ausgehen, dass die Menschen immer auf der Höhe ihrer Zeit waren.

Spektrum: Die Fundstelle Schöningen soll etwas jünger sein als die von Bilzingsleben. Wieso sprechen Sie bei Schöningen trotzdem von rund 400 000 Jahren, während Dietrich Mania für Bilzingsleben ein Alter von rund 370 000 Jahren angibt?

Thieme: Der Thüringer Siedlungsplatz ist tatsächlich ein wenig älter, das steht fest. Er gehört in das Optimum einer Warmzeit, das Jagdlager von Schöningen lag schon im Übergang zur nächsten kälteren Phase. Abgesehen von den abgerundeten Zahlen – über die genaue Datierung sind wir uns noch nicht völlig einig, da viele Analysen noch ausstehen. Sie ist auch für die Quartärgeologie interessant, weil es um die präzisere Gliederung des Eiszeitalters und seiner Klimaabläufe geht. Die Aussagen über die kulturelle Entwicklungshöhe dieser frühen Menschen berührt das nicht.

Spektrum: Eine Jagd auf große Tiere oder ganze Herden erforderte sicher eine genaue Koordination. Wie konnten sich die Menschen damals so gut verständigen?

Thieme: Viele meiner Kollegen haben selbst dem um ein Vielfaches jüngeren Neandertaler Sprache bisher kaum zugestanden. Nach unseren neuen Befunden gab es in den Zeiten von Schöningen schon eine relativ komplexe Sprache. Die Organisation einer solchen Jagd bedurfte detaillierter Planung, beginnend mit speziellen Steinwerkzeugen zum Fällen geeigneter Stämme wie auch für die Anfertigung von Speeren, das Herstellen der Waidmesser, die fertig mit hin zu dem Platz gebracht wurden, der Absprache, wer wann und wo welche Aufgaben übernimmt. Dann das Auflauern des Wildes, das eine subtile Kommunikation zwischen den Jägern – sicherlich weit mehr als zehn Personen – erforderte. Wer glaubt, dass alles dies mit Grunzlauten und Armgefuchtel durchführbar war, irrt schlichtweg.

Das war ein koordiniertes, sekundengenau abgestimmtes Geschehen, bei dem jede Handlung sitzen musste, weil die Tiere sehr schnell und ständig fluchtbereit waren. Dann das Ausweiden dieser riesigen Menge an Jagdbeute, das systematische Verarbeiten des Fleisches, der Knochen und die Markentnahme ...

Spektrum: Das klingt nach Großschlachterei. Verdarb das Fleisch nicht zu schnell?

Thieme: Ja, in wenigen Tagen. Darum haben die Menschen es vermutlich schnell aufbereitet: es in Streifen geschnitten, an der Luft getrocknet oder geräuchert, um es – wohl für den Winter – haltbar zu machen. Das alles waren hochkomplexe Arbeitsabläufe, die nicht ohne Sprache durchführbar waren.

Spektrum: Lebte man damals fast nur von Fleisch, also hauptsächlich der Arbeitsleistung der Männer? Trugen die Frauen zum Lebensunterhalt überhaupt in größerem Umfang bei?

Thieme: Das taten sie vermutlich in der gesamten Bandbreite, ähnlich wie bei heutigen Jägervölkern. Dieses martialische Bild, bei dem ein Jäger pausenlos Waldelefanten zur Strecke bringt, stimmt ja nicht. Einen Großteil der Existenzsicherung leisteten die Frauen und die Kinder, die täglich Wurzeln, Beeren, Nüsse, Eier sammelten – was immer in der jeweiligen Landschaft zu finden war, bis hin zu Muscheln, Krebsen, Fischen. Denn ein Jagderfolg stellte sich nicht immer ein. Nur alle paar Wochen wurde ein größeres Wild zur Strecke gebracht und bereicherte den Speiseplan.

In den kühleren Klimaphasen, in die das Jagdlager von Schöningen fällt, war das pflanzliche Nahrungsangebot möglicherweise weniger groß. Also hatte man sich spezialisiert – in diesem Fall auf Pferde – und wird das gesamte Nahrungsangebot bis hin zu Hasen und Enten genutzt haben. Da waren natürlich alle Gruppenmitglieder eingespannt. Und wer sagt uns, ob nicht auch junge Frauen am Jagdgeschehen, beim Zutreiben von Wild, beim Belauern und so weiter, beteiligt waren?

Spektrum: Sprechen die zierlicheren der Speere von Schöningen vielleicht dafür, dass auch Frauen damit operierten?

Thieme: Ich denke schon. Der kleinste Speer hat eine Länge von 1,80 Meter, bei einem Maximaldurchmesser von drei Zentimetern, der längste misst 2,50 Meter und im Durchmesser fünf Zentimeter. Ich nehme an, dass den kleinen Speer ein junger Bursche benutzte, der vielleicht zum ersten Mal mit auf der Jagd war, oder eben eine Frau. Ohnehin waren auch ▷

NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR DENKMALPFLEGE

Mitten unter zahlreichen Pferdeknochen lag der erste gefundene Speer, dessen Ende (im Bildhintergrund auf dem kleinen Sockel) auf diesem Foto von 1995 bereits freipräpariert ist. Der Rest steckt noch in der Schicht links davon.

>>

die Frauen mit Speeren ausgerüstet, um sich selbst und die Kinder vor Raubtieren schützen zu können.

Spektrum: Dann besaßen die Menschen damals keine anderen Waffen?

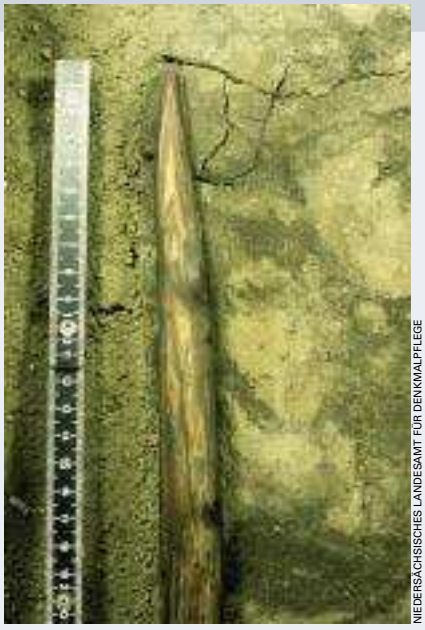
Thieme: Doch! Aus Schöningen stammt ein weiteres für die Altsteinzeit bislang einmaliges Objekt: Ein Fichtenholzstab, 78 Zentimeter lang und an beiden Enden sorgfältig zugespitzt, mit einem größten Durchmesser von drei Zentimetern in der Mitte. Mit ähnlichen Stäben erlegten die Uraustralier Vögel und andere Kleintiere. Wir bezeichnen sie als Wurfstöcke oder Wirbelhölzer. Man fasst sie an einem Ende und schleudert sie so, dass sie um ihre eigene Achse rotieren. Wer damit eine aufflatternde Entenschar trifft, holt immer einen Braten vom Himmel.

Unweit einer Feuerstelle entdeckten wir noch ein bisher unbekanntes Holzgerät der Altsteinzeit: einen knapp neunzig Zentimeter langen Fichtenholzstab mit angekohltem Ende. Darüber hängten die Menschen wohl Fleischstreifen, die sie rösteten. Während die Speere und der Wurfstock extrem sorgfältig glatt gearbeitet sind, blieb bei diesem Bratspieß am Ende der zehn Zentimeter langen angekohlten Zone ein fast ein Zentimeter langer Astüberstand stehen. Wahrscheinlich mit Absicht, sieht das doch wie ein Stopplager aus, damit das Fleisch nicht abrutschen und in die Glut fallen konnte. Und zu einem weiteren aufregenden neuen Holzgerät, wohl ein Grabstock, wird zurzeit die Publikation vorbereitet.

Spektrum: So ein Pferd ist ja ein relativ großes Beuteteil, das man schwer über weite Strecken transportieren kann.

Thieme: Der gesamte bisher dokumentierte Grabungsbefund spricht dafür, dass die Pferde tatsächlich am Ort getötet und dort zügig zerlegt worden sind. Die Schädel sind komplett mit Unterkiefern erhalten, Röhrenknochen wurden aufgeschlagen, um Mark zu gewinnen. Sicherlich wurde auch das Fleisch dort konserviert. Ich vermute, dass gleich in der Nachbarschaft vielleicht zwei, drei

Altpaläolithische Holzgeräte aus Schöningen, Lkr. Helmstedt. Bedeutsame Funde zur Kulturentwicklung des frühen Menschen. Von Hartmut Thieme, in: Germania (Mainz), Bd. 77, S. 451. 1999



NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR DENKMALPFLEGE

Die Jäger von Schöningen hatten die Spitzen ihrer Speere mit äußerster Sorgfalt symmetrisch herausgearbeitet.

Hütten errichtet waren, in denen die Menschen den Winter zubrachten. Denn die Schlachtabfallzone muss unter Kontrolle des Menschen gestanden haben, weil wir an den zahllosen Knochen keinerlei Verbissspuren durch große Raubtiere wie Hyänen oder Löwen finden.

Wir können sicherlich bei so einer großen Anzahl von Tieren annehmen, dass man auch die Felle genutzt hat, möglicherweise für Kleidung oder als Abdeckungen der Wohnbauten. Damals war der geschlossene warmzeitliche Wald längst verschwunden. Eine offene Wald- und Wiesensteppenlandschaft hatte sich ausgebreitet. Es herrschten sicherlich niedrigere Jahresdurchschnittstemperaturen als heute und dementsprechend kühle Winter. Da kann man sich nur durch Kleidung schützen. Vielleicht haben die Menschen einfache Überwürfe, Ponchos, oder legginsartige Kleidungsteile aus den Pferdehäuten gefertigt. Um sich in diesen Landschaften zu bewegen, gab es möglicherweise auch Fußbekleidung.

Spektrum: Nochmal zu den Speeren. Ließen die Menschen sie liegen, weil sie bei der Jagd zerbrachen?

Thieme: Nein. Alle Speere lagen inmitten der Pferdereste, das heißt inmitten der Schlachtabfallzone und waren weit gehend intakt. Da stellt sich die Frage: Weshalb ließen die Menschen sie zurück? Aus Dummheit, Vergesslichkeit oder war das Absicht und damit möglicherweise Teil des Jagdrituals?

Spektrum: Das würde bedeuten, Menschen der Art *Homo erectus* hätten vor 400 000 Jahren nicht nur perfekte Materialkenntnisse, sondern bereits rituelle Vorstellungen gehabt.

Thieme: Ja, mir fällt jedenfalls keine andere sinnvolle Erklärung für diesen außergewöhnlichen Befund ein. Vielleicht haben die Menschen gedacht – wofür es viele Beispiele aus der Ethnografie gibt: Wir haben den Pferden, um selbst zu überleben, ihre Körper genommen, und um die Geister der Tiere wieder zu versöhnen, müssen wir die Waffen, die getötet haben, zurücklassen – auch um künftiges Jagdunglück zu vermeiden.

Spektrum: Dazu ist ein wesentlich komplexeres Denken nötig, als man es den Menschen dieser Zeit bisher zugetraut hat. Haben wir die Fähigkeiten dieser frühen Menschen bislang unterschätzt?

Thieme: Ich denke schon. Es erfordert eine große Planungstiefe, sämtliche Arbeitsabläufe für solch eine Großwildjagd abzustimmen, alle Gerätschaften herzustellen und bereitzuhalten und auch die anschließende Zerlegung der Beute zu organisieren und zu bewältigen; das ist eine ungeheure gedankliche, gesellschaftliche und organisatorische Leistung. Im Grunde unterscheidet sich das Jagdverhalten dieser Menschen nicht von dem einer *Homo-sapiens*-Gruppe vor 20 000 Jahren. Auch einen Totenkult wird es schon beim *Homo erectus* gegeben haben. In dieser Zeit sind jedenfalls vielfach die Schädel von Verstorbenen an Lagerplätze gebracht und eine Zeit lang aufbewahrt worden. Man wollte wohl diese Teile vor Aasfressern schützen, was auf eine respektvolle Behandlung der Toten hinweist. Wie ja auch die Schädel der Pferde von Schöningen nicht zerschlagen sind – ein Erstbefund in der Altsteinzeit. Auch das ein Ritual, hinter dem eine ehrfurchts- und respektvolle Behandlung des erbeuteten Wildes stehen mag.

Das Interview führte **Dr. Henning Engeln**, Wissenschaftsjournalist in Hamburg.

Das Ende des Raumschiffs Erde

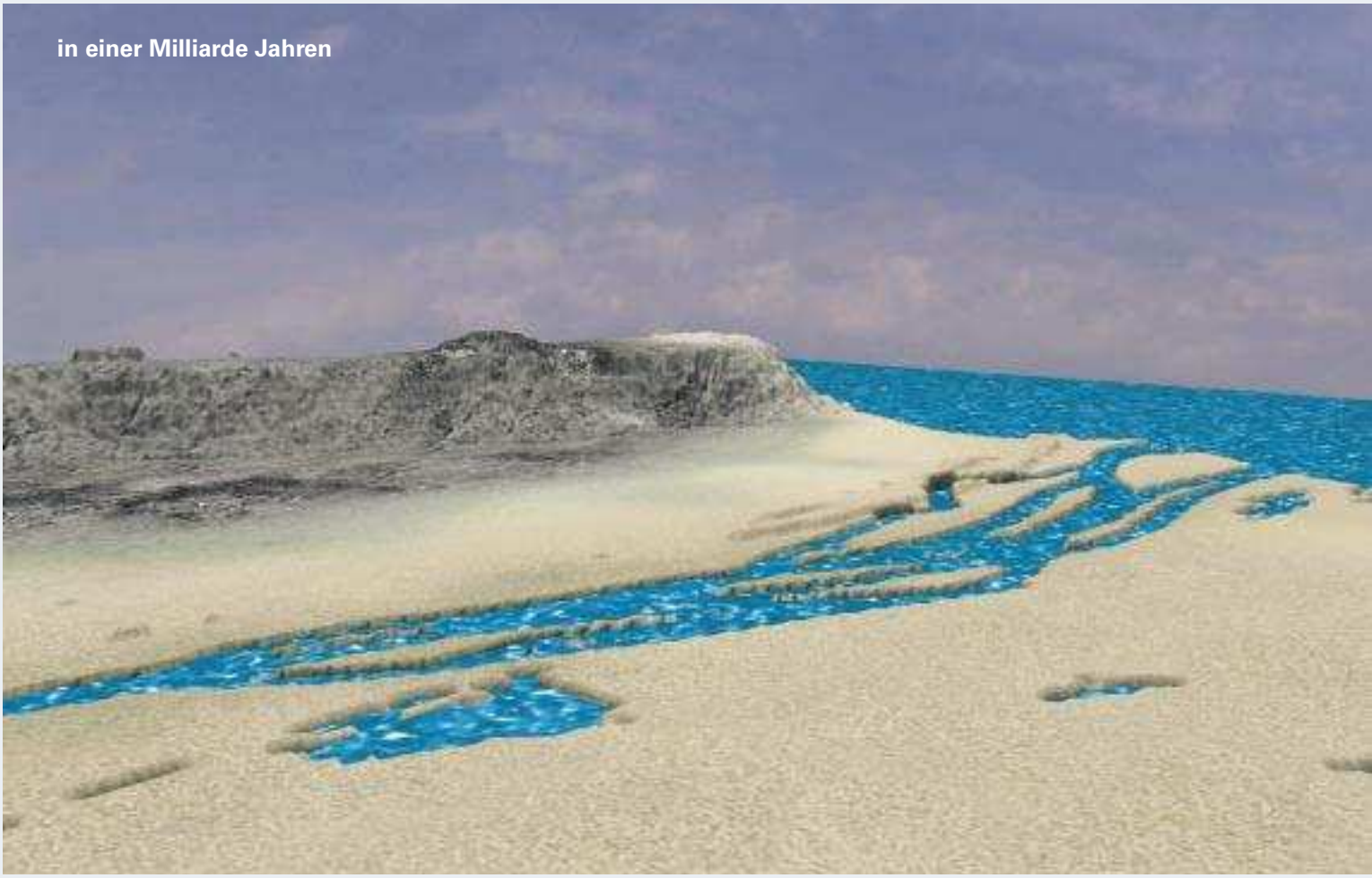
Eine immer stärker strahlende Sonne wird das irdische Leben in einigen hundert Millionen Jahren auslöschen. Der Untergang der Biosphäre verläuft dabei annähernd spiegelbildlich zu ihrem Beginn.

Von Christine Bounama, Werner von Bloh und Siegfried Franck

Wenn die Sonne sich in 6,5 Milliarden Jahren von einem Hauptreihenstern zum Roten Riesen entwickelt, wird sie sich enorm aufblähen, Merkur, Venus und vielleicht auch die Erde verschlucken und ihre Leuchtkraft verdoppeln. Zu diesem Zeitpunkt ist alles Leben auf unserem Heimatplaneten längst verschwunden.

Schon in 3,5 Milliarden Jahren dürfte unser Zentralgestirn, wie der deutsche Astrophysiker Albrecht Unsöld 1967 bereits prophezeite, um vierzig Prozent heller scheinen als heute. Dann wird es die Erdoberfläche über den Siedepunkt von Wasser erhitzen. Spätestens jetzt kann keinerlei organisches Leben mehr auf der Erde existieren.

Heute machen wir uns Sorgen über die vom Menschen verursachte globale Erwärmung, die das Klima in den kommenden Jahrzehnten oder Jahrhunderten spürbar verändern wird. Doch selbst die



BEIDE GRAFIKEN: SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

schlimmsten unter diesen Katastrophenszenarien, so erschreckend sie auch sind, verblassen vor dem, was die Erde in einigen hundert Millionen Jahren erwartet.

Interessant dabei ist: Während heute ein Übermaß an Kohlendioxid (CO_2), das der Mensch bei der Verbrennung fossiler Treibstoffe und der Rodung tropischer Regenwälder freisetzt, einen fatalen Treibhauseffekt entfaltet, dürfte auf lange Sicht eher ein Mangel an diesem Gas herrschen, das Pflanzen für ihre Photosynthese brauchen. Doch auch ohne Kohlendioxid und seine Treibhauswirkung wird sich unter der zunehmenden Leuchtkraft der Sonne die Erdatmosphäre schließlich unbarmherzig aufheizen.

Ende als Spiegel des Anfangs?

Das geschieht zwar erst so weit in der Zukunft, dass es uns im Grunde nicht zu berühren braucht. Dennoch liegt es in der Natur des Menschen, auch wissen zu wollen, was wohl in fernen Zeiten geschieht, die er nicht mehr selbst erlebt. Sich das Schicksal unserer Welt in kommenden Äonen auszumalen, übt eine geheimnisvolle Faszination aus. Wissenschaftler sind dabei in der glücklichen Lage, nicht nur auf ihre Fantasie angewiesen zu sein.

Für eine breite Leserschaft beschrieben jüngst der Paläontologe Peter D. Ward und der Astronom Donald Brownlee ihre Sicht von »Leben und Tod des Planeten Erde« – in ihrem gleichnamigen Buch von 2002. Anhand wissenschaftlicher Erkenntnisse und plausibler Vermutungen zeichnet es ein Bild vom einstigen und künftigen Schicksal des Globus.

Im Zentrum steht die These, dass sich die geologische Vergangenheit in gewisser Weise spiegelbildlich in der planetaren Zukunft wiederholt. Zwar gilt dies sicher nur in Teilaspekten und bei oberflächlicher Betrachtung – zum Beispiel dürfte das irdische Leben mit den einzelligen Organismen enden, mit denen es begann, oder die Erde zum Glutball ohne Wasser werden, der sie am Anfang war. Aber eines ist gewiss: Wenn wir das weitere Schicksal unseres Planeten vorhersagen wollen, brauchen wir Computermodelle, die in der Lage sind, die bisherige Geschichte des Globus seit seiner Entstehung vor 4,6 Milliarden Jahren getreu zu reproduzieren. Erst wenn die Simulation der Vergangenheit gelingt, kann man die Modellrechnungen in die Zukunft ausdehnen und den Zeitrahmen für das Überleben der Biosphäre abschätzen. Ein solches Computermodell hat unsere Arbeitsgruppe am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung kürzlich entwickelt. ▷

In etwa einer Milliarde Jahren gibt es keine Landpflanzen mehr. Die heutigen grünen Landschaften weichen nacktem Gestein. Die Temperatur steigt, immer mehr Wasser befindet sich als Dampf in der Atmosphäre und der Meeresspiegel sinkt. Eine starke Erosion beginnt die Erdoberfläche einzuebnen, während die vulkanische Aktivität erlahmt.

▷ Das Klima der Erde wird durch die Bilanz der Energieflüsse von Ein- und Abstrahlung bestimmt. Die Einstrahlung hängt von der Leuchtkraft der Sonne und der mittleren planetaren Albedo (dem Rückstreuvermögen der Erde) ab. Maßgeblich für die Abstrahlung hingegen ist die langwellige Wärmestrahlung der Erdoberfläche. Diese verlässt die Atmosphäre größtenteils nicht auf direktem Wege, sondern wird von den natürlichen Treibhausgasen, vor allem Wasserdampf und Kohlendioxid, absorbiert und teilweise nach unten zurückgestrahlt.

Dadurch erhöht sich die Temperatur der Erdoberfläche um 33 Grad Celsius – ein Phänomen, das als natürlicher Treibhauseffekt bekannt ist. Ohne diese Zusatzheizung betrüge die globale Mitteltemperatur –18 statt +15 Grad Celsius. Damit macht der natürliche Treibhauseffekt das Leben auf der Erde überhaupt erst möglich.

Seine Intensität hängt allerdings von der Zusammensetzung der Atmosphäre ab, und die hat sich seit der Entstehung der Erde gravierend verändert. Der geologische Nachweis, dass es schon vor 4,3 Milliarden Jahren flüssiges Wasser auf der Erdoberfläche gab, bestätigt das. Wäre die Zusammensetzung der Atmosphäre damals die gleiche gewesen wie heute, hätte die globale Oberflächentemperatur nämlich noch vor zwei Milliarden Jahren unter dem Gefrierpunkt gelegen, weil die Sonne zu der Zeit viel schwächer schien. Tatsächlich enthielt die frühe Lufthülle aber relativ große Mengen an Treibhausgasen wie Kohlendioxid und Methan. Diese sorgten dafür, dass es auf dem Globus sogar wärmer war als heute (Spektrum der Wissenschaft 9/2004, S. 62).

Überhaupt herrschten auf der Erde – mit gewissen Schwankungen und wenigen Ausreißern – fast durchweg lebensfreundliche Temperaturen. Woran liegt das? Wie sich herausgestellt hat, verfügt unser Planet über einen natürlichen Thermostaten, der extreme Klimaschwankungen verhindert: den globalen Karbonat-Silikat-Kreislauf. Bei steigenden Temperaturen entzieht er der Atmosphäre über einen faszinierenden Rückkopplungsmechanismus das Treibhausgas Kohlendioxid und sorgt so für Abkühlung.

Kühler dank Verwitterung

In einem wärmeren und feuchteren Klima beschleunigt sich nämlich die Verwitterung von Silikaten, die rund sechzig Prozent aller irdischen Minerale ausmachen. Kohlendioxid aus der Luft, das sich in Regenwasser gelöst hat, entzieht dem Silikatgestein dabei Kalzium und wird mit diesem zusammen (als Kalziumhydrogenkarbonat) ins Meer gespült. Dort werden die Verwitterungsprodukte als Kalk (Kalziumkarbonat) abgeschieden oder von Organismen in Kalkschalen eingebaut, die sich nach dem Tod der Lebewesen auf dem Meeresboden ablagern. Im Sediment bleibt das Kohlendioxid erst einmal für lange Zeit gebunden.

Aber nicht für immer. Wie die Geophysiker herausgefunden haben, ist die Erdschale ein Mosaik aus starren Platten, die unabhängig voneinander – wie Eisschollen im Wasser – auf dem zähplastischen Erdmantel treiben. Wenn dabei zwei Platten zusammenstoßen und die eine sich unter die andere schiebt – ein als Subduktion bezeichneter Vorgang –, gelangen mit ihr zusammen auch die Karbonat-Ablagerungen in den Erdmantel. Bei den hohen Temperaturen und Drücken dort zersetzen sie sich aber.

Dabei bildet sich Silikatgestein zurück, und Kohlendioxid wird frei. Dieses kann im Zuge vulkanischer Prozesse – an so genannten Subduktionszonen, Hot Spots und mittelozeanischen Rücken – aus dem Mantel entweichen und sich erneut in der Atmosphäre ansammeln, sodass die Temperatur wieder ansteigt. Insgesamt stellt sich auf diese Weise ein Gleichgewichtszustand ein.

In Zukunft wird dieser Thermostat aber an seine Grenzen stoßen, weil der Variationsspielraum der Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre irgendwann nicht mehr ausreichen wird, um die zunehmende Einstrahlung der altern-

C_4-Pflanzen gehört die Zukunft

Verschiedene Pflanzen wie Zuckerrohr (unten) oder Mais haben Mechanismen entwickelt, um die Fixierung von Kohlenstoff bei der Photosynthese effizienter zu gestalten. Sie erhöhen die Kohlendioxidkonzentration im Gewebe, sodass sie das Gas auch dann noch verwerten können, wenn sein Anteil in der Außenluft sehr gering ist. Im ersten Schritt entsteht dabei ein vierkettiges Kohlenstoffgerüst statt wie sonst ein dreikettiges. Deshalb spricht man von C_4-Photosynthese.

In ferner Zukunft wird der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre sinken. Dann dürften die C_4-Pflanzen einen Vorteil gegenüber den herkömmlichen C_3-Gewächsen wie Getreide und Kartoffeln haben und diese allmählich verdrängen. Möglicherweise ist die Evolution des C_4-Mechanismus in mehreren, nicht verwandten Pflanzengruppen schon eine Anpassung an sinkende Kohlendioxidkonzentrationen während der jüngeren Erdgeschichte.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Auf Kohlendioxidmangel vorbereitet: C_4-Pflanzen wie Zuckerrohr

den Sonne auszugleichen. Mit Hilfe von Computermodellen haben verschiedene Wissenschaftler versucht, diesen Zeitpunkt des Zusammenbruchs zu bestimmen und herauszufinden, was dann mit dem irdischen Leben passieren wird.

Im Jahre 1982 machten sich die britischen Wissenschaftler James E. Lovelock und Mike Whitfield erstmals daran, die Lebensspanne der Biosphäre abzuschätzen. Ihrem qualitativen Modell liegt die Gaia-Hypothese von Lovelock und Lynn Margulis von 1974 zu Grunde. Sie betrachtet die gesamte Erde (griechisch *gaia*) als eine Art Superorganismus. Das gekoppelte System aus Geo- und Biosphäre – so die Kernaussage – soll über erdgeschichtliche Zeiträume derart auf äußere Einflüsse reagieren, dass günstige Existenzbedingungen für das Leben auf der Erde erhalten bleiben oder überhaupt erst geschaffen werden.

Neben den Kohlenstoffkreislauf mit seiner rein abiotischen Thermostatwirkung tritt dabei ein biologischer Kontrollmechanismus: die biogene Verstärkung der Verwitterung. Höhere Pflanzen, aber auch Algen, Flechten und Moose, die direkt auf dem Fels sitzen, scheiden über ihre Wurzeln Säuren ab. Indem diese die Gesteinsminerale angreifen und die Oberfläche aufrauen, liefern sie günstige Angriffspunkte für Verwitterungsprozesse. Zudem erhöhen die Pflanzen durch Wurzelatmung den Kohlendioxidgehalt im Boden. Auch das fördert die Zersetzung des Silikatgesteins.

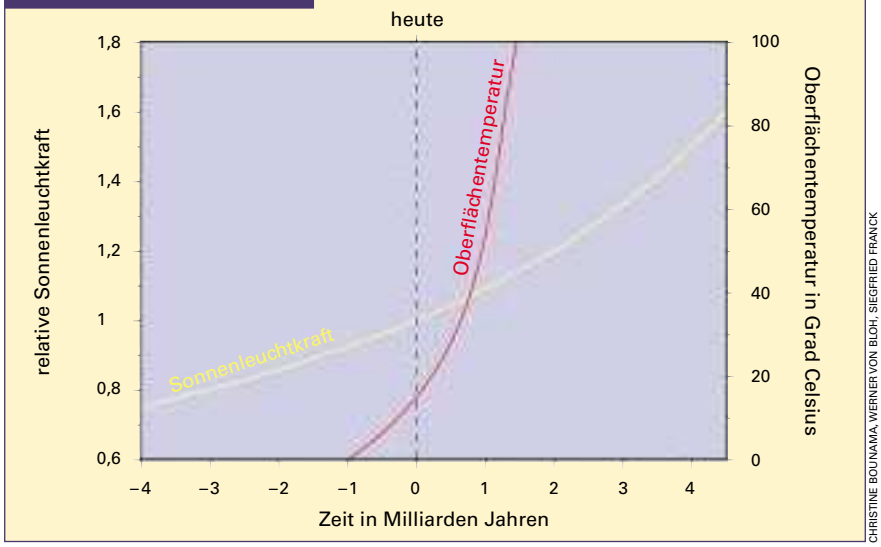
Erstickungstod schon in 100 Millionen Jahren?

Um die ansteigende Sonnenleuchtkraft so zu kompensieren, dass die Oberflächentemperatur konstant bleibt, muss der Kohlendioxidgehalt der Luft sinken. Dabei wird er irgendwann die Minimalkonzentration unterschreiten, die Pflanzen für ihre Photosynthese brauchen. Lovelock und Whitfield nahmen für diese Konzentration einen Wert von 150 millionstel Volumenanteilen oder kurz: ppm *(parts per million)* an und schätzten ab, wann er erreicht würde. Mit einem einfachen Klimamodell kamen sie dabei auf einen Zeitraum von nur 100 Millionen Jahren. Danach, so ihre Prophezeiung, müsste alles Leben zu Grunde gehen, weil ihm die pflanzliche Nahrungsgrundlage entzogen wäre.

Allerdings können sich Pflanzen durchaus an geringere Kohlendioxidkonzentrationen und höhere Temperaturen anpassen. Solche Anpassungen gibt es bereits: Nach der Art der Fixierung des Kohlendioxids in der Photosynthese unterscheidet man C_3- und C_4-Pflanzen (Spektrum der Wissenschaft 3/1992, S. 64). Heute dominieren auf der Erde die Ersteren, darunter Getreide und Kartoffeln. C_4-Pflanzen wie Mais, Hirse und Zuckerrohr kommen dagegen mit wesentlich geringeren Kohlendioxidkonzentrationen aus. Deshalb wird sich das Artenspektrum in ferner Zukunft zu ihren Gunsten verschieben. Der Grenzwert von 150 ppm, den Lovelock und Whitfield ihren Abschätzungen zu Grunde legten, gilt für C_3-Pflanzen, bei C_4-Pflanzen beträgt er dagegen nur zehn ppm.

Im Jahre 1992 lieferten zwei US-Forscher erneut eine Antwort auf die Frage, ▷

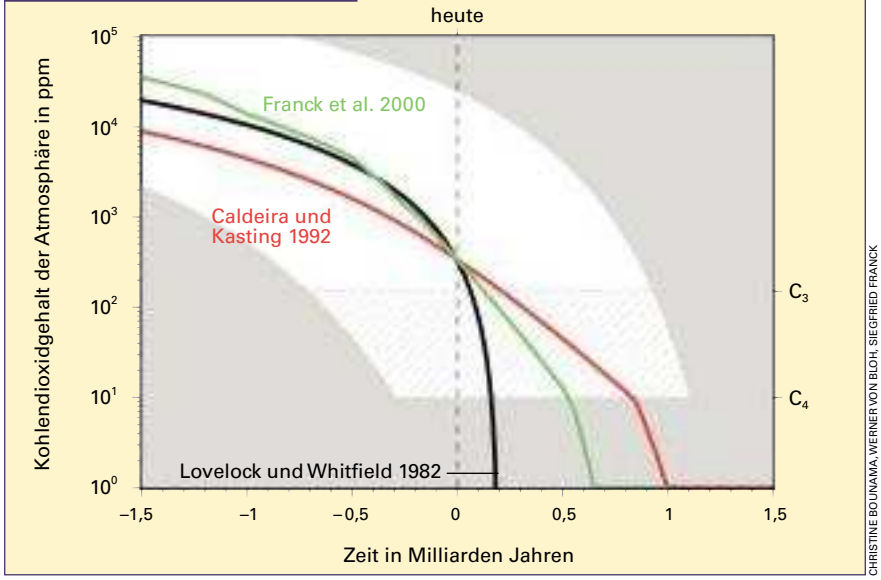
Sonne und Erdklima



CHRISTINE BOUNAMA, WERNER VON BLOH, SIEGFRIED FRANCK

Die Sonne strahlt mit zunehmendem Alter immer stärker und heizt die Erde so allmählich auf. Unter der Annahme, dass die Atmosphäre früher dieselbe Zusammensetzung hatte wie heute und sich daran nichts ändern wird, ergibt sich der hier gezeigte Verlauf der mittleren globalen Oberflächentemperatur.

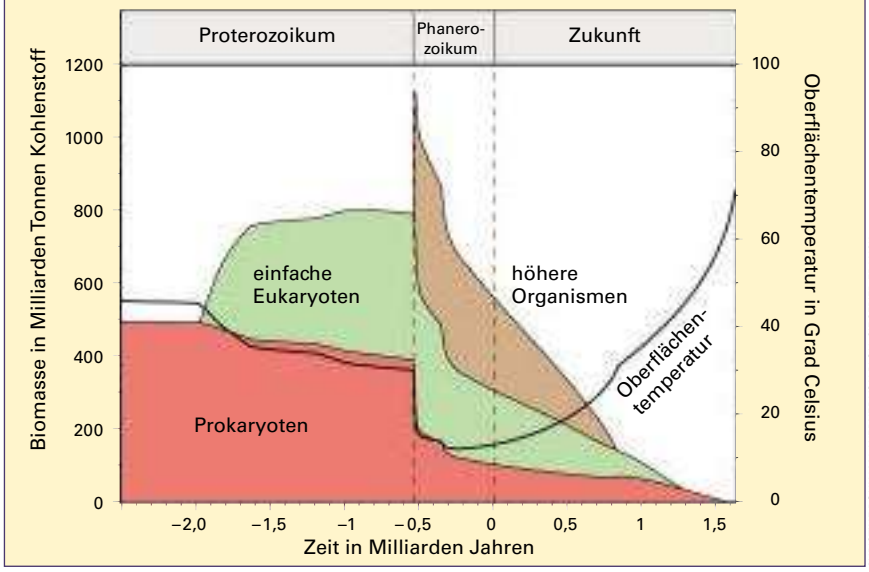
Kohlendioxid und Leben



CHRISTINE BOUNAMA, WERNER VON BLOH, SIEGFRIED FRANCK

Unterschiedlich komplexe Erdsystemmodelle liefern jeweils eine andere zeitliche Entwicklung des Kohlendioxidgehalts der Atmosphäre. Der weiße Korridor bezeichnet den Bereich von Umweltbedingungen, in dem Biomasseproduktion möglich ist – im schraffierten Teil allerdings nur durch C_4-Pflanzen.

Entwicklung des Lebens



CHRISTINE BOUNAMA, WERNER VON BLOH, SIEGFRIED FRANCK

Mit einem dynamischen Erdsystemmodell haben die Autoren die Entwicklung der globalen Oberflächentemperatur und der Biomasse simuliert. Nach der Entwicklungshöhe der Lebensformen unterscheidet es drei Biosphärenpools: Prokaryoten (rot), einfache Eukaryoten (grün) und höhere Organismen (braun).

▷ wie lange die irdische Biosphäre noch überleben kann. Ken Caldeira vom Lawrence-Livermore-Laboratorium in Livermore (Kalifornien) und James F. Kasting von der Pennsylvania State University in University Park präsentierten erstmals ein quantitatives Modell für die Zukunft der Erde. Bei ihren Schlussfolgerungen betrachteten sie drei Faktoren, welche die Lebensspanne der Biosphäre begrenzen können: Mangel an Kohlendioxid, zu hohe Oberflächentemperaturen und totaler Wasserverlust der Erde.

Neben einem Standardmodell zur Entwicklung der solaren Leuchtkraft benutzten Caldeira und Kasting ein für Zukunftsszenarien gut geeignetes Klimamodell. Es reagiert wesentlich empfindlicher auf ein Absinken der Kohlendioxidkonzentration unter 350 ppm als das von Lovelock und Whitfield. Dadurch sind die Auswirkungen auf die Temperatur viel größer. Außerdem gingen Caldeira und Kasting von C_4-Pflanzen aus.

Unter der Annahme, dass die Vulkane dereinst genauso viel Kohlendioxid ausstoßen wie heute und auch die Verwitterungsrate unverändert bleibt, berechneten sie eine Gnadenfrist von 900 Millionen Jahren, die der Biosphäre noch verbleiben könnte. Falls das Leben nicht an CO_2-Mangel zu Grunde ginge, würden ihm die steigenden Oberflächentemperaturen zum Verhängnis. Im Modell von Caldeira und Kasting werden nach 1,5 Milliarden Jahren fünfzig Grad Celsius überschritten. Nur primitive Organismen könnten dann noch existieren. Nach weiteren 200 Millionen Jahren wird die Marke von hundert Grad Celsius erreicht, bei der fast alle Lebensformen endgültig aussterben.

Verhängnisvolles Verlöschen der Vulkane

Im Jahr 2000 begann sich schließlich auch unsere Gruppe mit der Überlebensspanne der irdischen Biosphäre zu befassen. Dabei bezogen wir einen weiteren, bisher unberücksichtigten Aspekt in die Berechnungen ein. Wir trugen der Tatsache Rechnung, dass die Intensität plattentektonischer Prozesse, die für den globalen Kohlenstoffkreislauf eine wichtige Rolle spielen, vom Entwicklungszustand des Systems – sprich: seinem Alter – abhängt.

Seit unser Planet vor etwa 4,6 Milliarden Jahren entstanden ist, kühlt sich sein Inneres beständig ab. Während der Wärmefluss aus dem Erdmantel entsprechend abklingt, verlangsamen sich alle geodynamischen Prozesse, die von ihm angetrieben werden. Das aber sind dieselben, die für das Ausgasen von Kohlendioxid sorgen. Die Annahme von Caldeira und Kasting, dass die CO_2-Emissionen von Vulkanen unverändert bleiben, war also nur eine sehr grobe Näherung – in Wahrheit werden sie zurückgehen.

Andererseits hängt die Verwitterung von der Gesamtausdehnung aller Kontinente ab, und auch diese ist veränderlich: Sie hat im Lauf der Erdgeschichte zugenommen und wird dies weiter tun. Damit liegt Silikatgestein auf einer immer größeren Fläche frei und ist der Verwitterung ausgesetzt.

Mit einfachen Ansätzen haben wir diese beiden Effekte in unser Modell eingebaut (Kasten rechts). Das Ergebnis ist, dass sich die Spanne bis zum Erreichen des Grenzwertes von zehn ppm Kohlendioxid für C_4-Pflanzen gegenüber der Vorhersage von Caldeira und Kasting deutlich verkürzt: Je nach Wahl des Modells für das Kontinentwachstum wird die Flora schon in 500 bis spätestens 600 Millionen Jahren an CO_2-Mangel zu Grunde gehen.

Vergleicht man die drei beschriebenen Vorhersagen, so wird deutlich, dass auf die erste, sehr pessimistische Abschätzung ein zu optimistischer Ausblick folgte. Unsere Ergebnisse liegen ungefähr in der Mitte (Bild S. 55 unten).

Inzwischen sind wir aber über die bisher betrachteten einfachen Modelle des globalen Kohlenstoffkreislaufs hinausgegangen. Ihr grober Zuschnitt erlaubt keine genaueren Aussagen – etwa darüber, wie das Verschwinden der Lebensformen im Einzelnen abläuft. Solche Prognosen erfordern vielmehr, auch die Flüsse zwischen den diversen Kohlenstoffreservoiren zu betrachten und für jeden Zeitpunkt der Erdgeschichte zu berechnen.

Ein entsprechendes dynamisches Modell hat unsere Gruppe in den letzten Jahren entwickelt. Darin werden außer dem Erdmantel und der Atmosphäre auch der Ozean, die Biosphäre und der im Gestein eingelagerte organische Kohlenstoff, das so genannte Kerogen, als Kohlenstoffreservoire berücksichtigt. Die Biosphäre haben wir in drei grundlegende Lebensformen unterteilt: Prokaryoten, einzellige Eukaryoten und höhere Lebensformen.

Prokaryoten sind Organismen ohne echten Zellkern. Zu ihnen gehören unter anderem die Bakterien und die Photosynthese treibenden Blaualgen (inzwischen als Cyanobakterien bezeichnet) sowie die Archaea: an extreme Bedingungen (hohe Temperaturen, Salzgehalte oder Säuregrade) angepasste Organismen, die früher den Bakterien zugerechnet wurden. Prokaryoten besiedelten die Erde als Erste.

Aus einer ihrer Entwicklungslinien bildeten sich dann die Eukaryoten: Lebewesen mit Zellkern und Zytoskelett. Einfache Vertreter sind Algen oder Urtierchen (Protisten) wie die Amöbe. Komplexe, höhere Lebensformen wie Pflanzen, Pilze und Tiere entwickelten sich erst relativ spät im Verlauf der Evolution. Die biogene Verstärkung der Verwitterung geht aber allein von ihnen aus. Sie sorgen damit für einen zusätzlichen Rückkopplungsprozess im Kohlenstoffkreislauf und beeinflussen ihre Umwelt am stärksten.

Alle drei Lebensformen, so unsere Annahme, können jeweils nur innerhalb eines bestimmten Bereichs der globalen Oberflächentemperatur leben und sich fortpflanzen. Diese Toleranzzone ist umso schmaler, je höher entwickelt ein Organismus ist. So brauchen Arten mit großer Gehirnmasse geringere Umgebungstemperaturen, um ihr zentrales Nervensystem kühlen zu können.

Blick zurück auf die Evolution

Vor etwa 542 Millionen Jahren – zu Beginn des Kambriums – gab es den »Urknall« der biologischen Evolution. Innerhalb von nur 40 Millionen Jahren kam es zum ersten massenhaften Auftreten von Vielzellern, einem plötzlichen Anstieg in der Artenvielfalt sowie der Biomasse und zur Entwicklung der meisten modernen Abstammungslinien (plus einiger weiterer, die inzwischen ausgestorben sind). Viele Wissenschaftler erklären diese »kambrische Explosion« damit, dass der Sauerstoffgehalt der Atmosphäre damals einen Schwellenwert erreichte, der einen Energiestoffwechsel auf Basis der Atmung ermöglichte.

Unser geodynamisches Modell liefert, angewandt auf die Frühgeschichte der Erde, jedoch eine andere Erklärung. Danach wurde die Oberfläche des langsam erkaltenden Globus zu Beginn des Kambriums gerade so kühl, dass komplexe vielzellige Organismen gedeihen konnten. Diese verstärkten den Abkühlungsprozess, indem sie die Verwitterung intensivierten, bei der das Treibhausgas Kohlendioxid gebunden und der Atmosphäre entzogen wird. So kam es zu einer nichtlinearen Rückkopplung zwischen Klima und Biosphäre, bei der die Oberflächentemperatur rasch so weit sank, dass optimale Lebensbedingungen für die komplexen höheren Organismen herrschten. Auch wenn unsere Simulation nur Photosynthese treibende Lebensformen berücksichtigt, so kann man doch Rückschlüsse auf Tiere und Menschen ziehen, da diese indirekt über die atmosphärische Sauerstoffkonzentration und direkt über die Nahrungsnetze von der Photosynthese abhängig sind und sich zeitgleich mit den Pflanzen entwickelt haben sollten.

Unser Modell reproduziert korrekt, dass die drei Lebensformen zwar nachei- ▷

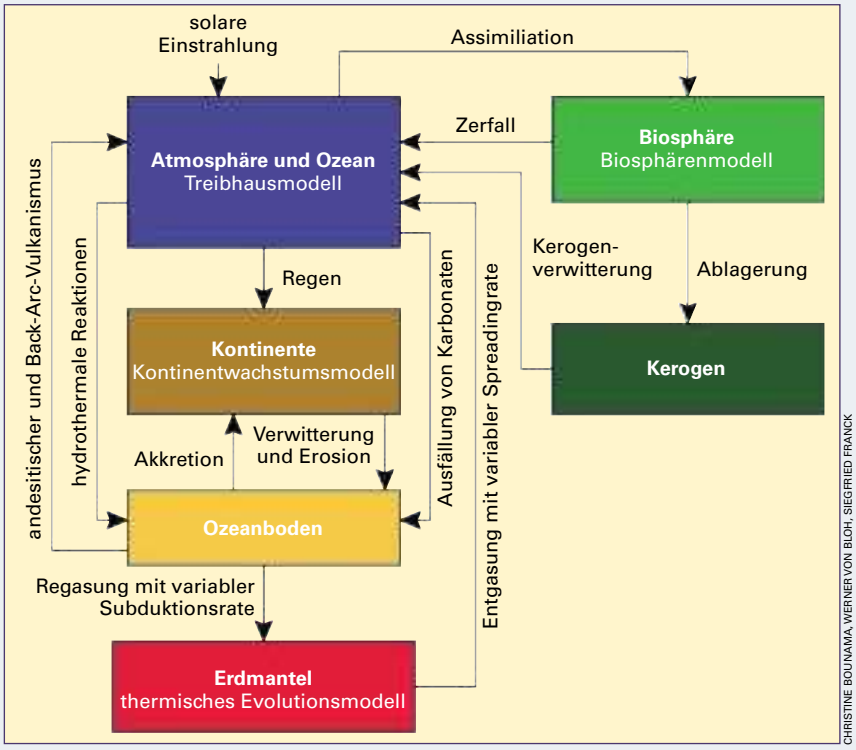
Einfache und komplexe Erdsystemmodelle

In unserem Modell von 2000 haben wir erstmals berücksichtigt, dass sich die geodynamischen Prozesse auf lange Sicht abschwächen, weil das Erdinnere immer mehr auskühlt. Über sehr lange Zeiträume in der Größenordnung von mehr als 100000 Jahren betrachtet, sollten sich Quellen und Senken für Kohlendioxid im Atmosphäre-Ozean-System ausgleichen.

Die Hauptquelle von atmosphärischem Kohlendioxid sind die mittelozeanischen Rücken, an denen aufsteigendes Magma aus dem Erdinnern zu neuem Ozeanboden erstarrt, der seitlich wegwandert. Die Rate dieser Meeresbodenspreizung *(seafloor spreading)* lässt sich mittels Konvektionsmodellen aus der thermischen Geschichte der Erde bestimmen. Als Senke für atmosphärisches Kohlendioxid wirkt die Verwitterung, deren Ausmaß von der gesamten Kontinentfläche abhängt.

Betrachtet man auf den heutigen Wert normierte und damit dimensionslose Größen, lässt sich das Verhältnis von Spreizungsrate zu Kontinentfläche bilden. Mit dem einfachen Ansatz, dass dieses Verhältnis – die geodynamische Antriebsrate – gleich der Verwitterungsrate ist, kann man das dynamische Gleichgewicht der Kohlendioxidflüsse zeitlich darstellen. Die Bioproduktivität hängt in unserem Modell wie in dem von Caldeira und Kasting von Oberflächentemperatur und atmosphärischem Kohlendioxidgehalt ab. Nur im Bereich zwischen null und fünfzig Grad wird überhaupt Biomasse produziert.

Sehr viel detaillierter ist hingegen das dynamische Erdsystemmodell, das wir mittlerweile entwickelt haben (siehe Grafik). Darin werden für jeden Zeitpunkt der Erdgeschichte die Flüsse zwischen einer Reihe von Kohlenstoffreservoiren berechnet. In unserem Fall sind das der Erdmantel, die Atmosphäre, der Ozean, die Erdkruste, der Ozeanboden, die Biosphäre und das Kerogen. Letzteres umfasst den dispersen, unlöslichen, organischen Kohlenstoff im Gestein – also insbesondere die Kohle- und Erdöllagerstätten.



CHRISTINE BOUNAMA, WERNER VON BLOH, SIEGFRIED FRANCK

nander erstmals auftraten, dann aber nebeneinander existierten. Heute besiedeln sie die Erde etwa zu gleichen Anteilen. Dereinst werden sie in umgekehrter Reihenfolge ihrer Entstehung wieder verschwinden. Dass sich auch die kambrische Explosion spiegelbildlich als gewaltige »Implosion« der Arten wiederholen wird, halten wir dagegen nicht für wahrscheinlich. Unser Modell liefert jedenfalls keinen Hinweis auf ein sprunghaftes Aussterben der höheren Organismen in der Zukunft. Auch eine Störung – etwa in Form eines plötzlichen Temperaturanstiegs – zöge keinen globalen Exitus nach sich. Das System ist sehr robust und würde sich nach kurzer Zeit erholen.

Gleichwohl sollten in etwa 800 bis 900 Millionen Jahren die höheren Lebensformen verschwinden, insbesondere die Pflanzen. Damit räumt unser verfeinertes dynamisches Modell diesen Organismen eine längere Überlebensspanne ein als der einfachere Vorgänger. Der Grund dafür ist, dass sich die biogen angetriebene Verwitterung mit der Zeit abschwächt, weil bei steigenden Temperaturen die Bioproduktivität abnimmt. Dadurch verbleibt mehr Kohlendioxid in der Atmosphäre, und der Mindestwert für die Photosynthese wird erst in 1,6 Milliarden Jahren erreicht.

Pflanzen sterben den Hitzetod

Dafür nimmt die globale Oberflächentemperatur aber schneller zu und übersteigt schon in 800 bis 900 Millionen Jahren die für höhere Lebensformen kritische Grenze von dreißig Grad Celsius. Die Pflanzen und Tiere gehen nach dem verfeinerten Modell also nicht an Kohlendioxidmangel zu Grunde, sondern an der Hitze. Das gilt auch für die einfachen Eukaryoten. Allerdings sind diese nicht so wärmeempfindlich und können noch bis zu einer globalen Mitteltemperatur von 45 Grad Celsius überleben. Deshalb sterben sie erst in etwa 1,2 bis 1,3 Milliarden Jahren aus, wenn dieser Wert erreicht wird. Die Prokaryoten folgen ihnen 300 Millionen Jahre später.

Doch in deren Fall ist die Todesursache nicht die Oberflächentemperatur, für die unser Modell zu diesem Zeitpunkt noch Werte unterhalb von sechzig Grad Celsius vorhersagt. Vielmehr wird sich der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre in etwa 1,6 Milliarden Jahren auf zehn ppm verringert haben, sodass die Cyanobakterien keine Photosynthese mehr treiben können. Die Erde ist dann, vielleicht abgesehen von Spuren extrem angepasster Mikroorganismen, zu einem »sterilen«, unbelebten Planeten geworden.

So weit die nüchternen Ergebnisse des Modells. Doch wie kann man sich das etappenweise Verschwinden des Lebens konkret vorstellen? Zunächst nimmt mit sinkender Kohlendioxidkonzentration die Produktion von Biomasse stetig ab. Üppige Vegetation wird spärlich, und während die immer stärker strahlende Sonne die Oberflächentemperaturen unerbittlich in die Höhe treibt, zieht sich die Pflanzenwelt auf den Kontinenten nach und nach in Nischen zurück. Schließlich kann sie sich auch dort nicht mehr halten. Das üppige Grün einstmals fruchtbarer Landschaften weicht einer allgemeinen graubraunen Ödnis.

Böden, die von den Pflanzen gebildet und festgehalten wurden, sind nun der Erosion preisgegeben: Sie werden abgetragen und von reißenden Flüssen in die Ozeane gespült. Zurück bleibt nacktes Gestein. Die letzten höheren Tiere, die sich den extremen Umweltbedingungen anpassen konnten, verhungern durch den Zusammenbruch der Nahrungsnetze.

Dem Augenschein zum Trotz sind Einzeller von jeher die beherrschende Lebensform an Land. Unbehelligt von höheren Organismen breiten sich Mikroben in Form von Matten weiträumig über das Gestein aus. Überall findet man diese schleimigen, gallertartigen Gebilde. Aber mit steigender Temperatur werden sie ebenfalls zurückgedrängt und teilen einige 100 Millionen Jahre nach dem Untergang der Landpflanzen deren Los.

Auch in den Ozeanen tobt nun der Überlebenskampf. Prokaryotische und eukaryotische Algen sowie andere komplexe Wasserpflanzen können prinzipiell nur in einer relativ dünnen Schicht an der Oberfläche gedeihen, in die noch genug Sonnenlicht vordringt. Doch diese durchlichtete Oberflächenschicht wird durch den enormen Schwebstoffeintrag der erodierenden Kontinente getrübt und erwärmt sich sehr schnell. Viele Meerespflanzen und -tiere halten solche Bedingungen nicht aus. Nur solche, die sich an ein Leben im Dunkeln unter Druck in größerer Tiefe angepasst haben, werden sich noch einige Zeit von absinkendem totem organischem Material ernähren können.

Die Masse der oberflächennahen Algen schrumpft jedoch bald auch dramatisch, weil die zum Wachstum nötigen Mineralstoffe – vor allem Phosphate und

Salzebenen wie hier bei Badwater im Tal des Todes in Kalifornien werden den Platz der ausgetrockneten Ozeane einnehmen.

Nitrate – knapp werden. Diese stammen heute überwiegend aus verrotteten Landpflanzen und verwitternden Böden (und gelangen über die Flüsse ins Meer). Beides wird dann nicht mehr existieren: Die Landpflanzen sind ausgestorben und die Böden weggespült.

Selbst die obere Ozeanschicht hat sich irgendwann so weit aufgeheizt, dass auch die letzten eukaryotischen Algen, die den Mineralstoffmangel überlebt haben, schließlich absterben. Damit sind zugleich die Lebewesen, die sich direkt oder indirekt von ihnen ernähren, zum Tode verurteilt.

Salzwüsten und Magmaozeane

An der Oberfläche der Ozeane und Kontinente gibt es in etwa 1,3 Milliarden Jahren also nur noch primitive einzellige Prokaryoten. Die tiefen Meeresschichten sind dann der einzige Ort, wo akzeptable Temperaturbedingungen herrschen. Vielleicht existieren noch einige höhere Organismen, die dort leben und sich von Bakterien ernähren können. Sie erhalten eine letzte Schonfrist.

Durch die intensive Erosion verlieren die Kontinente langsam ihr Relief: Sie werden förmlich eingeebnet. In etwa 1,6 Milliarden Jahren hat die gleißende Sonne die Temperaturen auf einen globalen Mittelwert von sechzig bis siebzig Grad Celsius getrieben. Das ist immer noch »kühl« genug für manche einzelligen Bakterien. Doch deren Schicksal wird durch den Kohlendioxidmangel in der Atmosphäre und bald auch im Ozean nun gleichfalls besiegelt. Übrig bleiben allenfalls primitive Organismen, die extrem hohe Temperaturen vertragen und unabhängig vom Kohlendioxid und vom Sonnenlicht existieren können – vielleicht durch Chemosynthese.

Bald aber beginnen die jetzt flachen, warmen und ausgedehnten Ozeane im großen Stil zu verdunsten. Die Luftfeuchtigkeit steigt rapide an. Wasser ist ein sehr effektives Treibhausgas. Je mehr sich als Dampf in der Atmosphäre befindet, desto heißer wird es und desto schneller verdunsten die Meere. Dieser galoppierende Treibhauseffekt setzt sich so lange fort, bis die Ozeane ausgetrocknet sind. Übrig bleiben riesige Salzebenen.

Die Oberflächentemperatur erreicht nun etwa 250 Grad Celsius. Speziell angepasste Mikroorganismen könnten in dieser Gluthölle vielleicht noch überleben, aber auch sie bräuchten für ihre Existenz flüssiges Wasser. Deshalb wird mit dem Verdampfen der Ozeane das Leben auf der Erde endgültig aussterben.

Während sich die Oberfläche aufheizt, kühlt das Innere unseres Planeten immer mehr aus. Als Folge davon lässt die tektonische Aktivität stetig nach; Vulkanismus gibt es so gut wie nicht mehr. Außerdem kommt spätestens jetzt die Drift der Kontinente zum Stillstand, weil der Ozeanboden zu trocken und zu starr ist, um sich zu biegen und unter die Kontinentalplatten abzutauchen. Nachdem es kein flüssiges Wasser mehr gibt und Verwitterung deshalb kaum noch stattfindet, reichert sich das wenige Kohlendioxid, das noch ausgast, aber wieder in der Atmosphäre an. Dort bewirkt es einen zusätzlichen Treibhauseffekt – neben dem des Wasserdampfs –, der den Temperaturanstieg beschleunigt.

In den oberen Atmosphärenschichten spaltet die zunehmend stärkere Sonne das Wasser zu Wasserstoff und Sauerstoff. Der Wasserstoff entweicht in den Weltraum, da die Schwerkraft der Erde nicht ausreicht, ihn festzuhalten. Zurück bleibt der Sauerstoff, der das Eisen der Gesteine oxidiert. Die Oberfläche nimmt dadurch eine rote Farbe an, ähnlich der des Mars. In etwa 3,5 bis 6 Milliarden Jahren könnte es auf der Erde so heiß sein, dass Magmaozeane entstehen; denn selbst Gestein beginnt zu schmelzen, wenn die Oberflächentemperatur über tausend Grad Celsius steigt.

Die Sonne wird sich im Zuge ihrer Umwandlung in einen roten Riesenstern so vergrößern, dass ihr Radius in etwa 7,8 Milliarden Jahren den der heutigen Erdbahn erreicht. Ob sie die Erde verschlingt – so wie zuvor Merkur und Venus –, ist trotzdem offen. Durch einen starken Sonnenwind wird sie bis dahin nämlich erheblich an Masse und damit Schwerkraft verloren haben, sodass die Erde bis auf das 1,7fache des heutigen Abstandes von ihr wegwandern könnte. Wie es dann auf unserem Heimatplaneten aussehen mag, darüber gibt es heute nicht einmal Spekulationen. ◁

Christine Bounama (Mitte) arbeitet als Geophysikerin auf dem Gebiet der Erdsystemanalyse und der Evolution terrestrischer Planeten. **Werner von Bloh** (rechts) beschäftigt sich mit integrierter Systemanalyse und geophysikalischer Modellierung. Er hat an der Universität Potsdam promoviert. **Siegfried Franck** (links) ist Professor für die Koevolution von Geo- und Biosphäre an der Universität Potsdam. Alle drei arbeiten am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Cambrian explosion triggered by geosphere-biosphere feedbacks. Von W. von Bloh et al., in: Geophysical Research Letters, Bd. 30, S. 1963 (2003)

The life and death of planet earth. Von Peter Ward und Donald Brownlee. Piatkus, London 2002

Reduction of biosphere life span as a consequence of geodynamics. S. Franck et al., in: Tellus, Bd. 52B, S. 94 (2000)

The life span of the biosphere revisited. Von Ken Caldeira und James F. Kasting, in: Nature, Bd. 296, S. 561 (1992)

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

QUARZUHREN

Ein Herz aus Stein

Siliziumdioxid lässt moderne Uhren präzise ticken.

Von Mark Fischetti

Fast 90 Prozent aller modernen Uhren funktionieren elektronisch. Batterien liefern die nötige Energie und Flüssigkristallanzeigen haben heute die Minuten- und Stundenzeiger ersetzt. Das Herz eines solchen Chronometers aber ist ein Oszillator aus Quarz, chemisch gesehen Siliziumdioxid. Damit gehen nach Angaben des amerikanischen Herstellers Timex selbst preiswerte Armbanduhren auf eine oder zwei Sekunden pro Monat genau.

Zahnräder, Pendel, Gewichte und Federn waren seit der Renaissance die Elemente, aus denen mechanische Zeitmesser gebaut wurden. Schweizer Uhrmachern gelang es Anfang des 19. Jahrhunderts, verlässliche und handhabbare Armbanduhren zu bauen; das Land kontrollierte diesen Markt für mehr als hundert Jahre. Quarzuhren wurden um 1940 erfunden, erste klobige Exemplare kamen in den 1960er Jahren in die Geschäfte. Die meisten Uhrmacher sahen darin eher eine Kuriosität. Einige Schweizer Firmen verbesserten die Konstruktion, doch es waren japanische Unternehmen, denen es gelang, die notwendigen Komponenten inklusive der Steuerelektronik zu miniaturisieren. Damit stürmten sie in den 1970er Jahren den Markt. Die Traditionsunternehmen in Europa benötigten fast zwanzig Jahre, um aufzuschließen.

Dank des so genannten piezoelektrischen Effekts verändert der Schwingquarz seine Ausdehnung unter elektrischer Spannung. Einmal ausgelenkt wie ein Pendel oder eine Stimmgabel, beginnt der Kristall elastisch zu schwingen. Umgekehrt lässt sich auf Grund der Formänderung eine Spannung am Quarz abgreifen. Damit steuert er einen elektrischen Schwingkreis, der letztlich die Impulse für die Zeitmessung liefert. Weil mit diesem Auslesen des Takts am Quarz ein Energieverlust verbunden ist, muss der Kristall periodisch wieder »angestoßen« werden.

Mechanische Uhren, die heute die Krone der Feinmechanik repräsentieren, prägen den Markt hochpreisiger Luxusprodukte. Ihre Spiralfeder-Unruh schwingt typischerweise fünfmal pro Sekunde hin und her, während ein Schwingquarz es auf 32 768 Vibrationen bringt. Diese zentrale Komponente wird mittlerweile großteils von japanischen Firmen und Micro Crystal SA, einer Tochter des Schweizer Uhrenherstellers Swatch, in Massen hergestellt, einige mit Verfahren der Chipfertigung. ◁

Der Autor **Mark Fischetti** ist Mitarbeiter von Scientific American. Die Redaktion dankt den Firmen Swatch und Casio für informelle Unterstützung.

Der Schrittmacher einer Digitaluhr ist ein Quarzkristall. Ein Mikroprozessor zählt seine Schwingungen und steuert dementsprechend die Anzeige. Diese wiederum beruht auf einer Kombination von Polarisationsfolien, Flüssigkristallen und winzigen Elektroden: Wie winzige Gitterstäbe lassen die Folien nur Licht bestimmter Ausrichtung hindurch; das wird dann reflektiert und lässt die Anzeige hell erscheinen. Werden die Flüssigkristalle, die zwischen den Polarisationsfolien liegen, elektrisch so angesteuert, dass sie ein Gitter mit um neunzig Grad verdrehter Orientierung bilden, kann dort kein Tageslicht hindurchdringen und der Bereich erscheint schwarz.

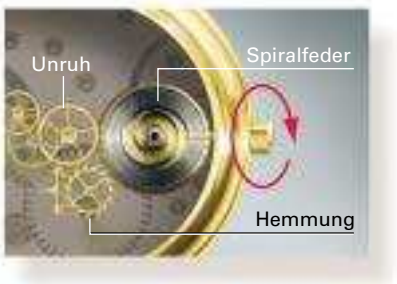
WUSSTEN SIE SCHON?

▶ Etwa 95 Prozent aller **Quarzuhren** werden von Batterien versorgt. Reichten diese in den Anfängen gerade einmal für 18 Monate, sind es heute schon bis zu zehn Jahre. Uhren mit Solarzellen setzen auf aufladbare Akkus oder speichern die aus Sonnenlicht gewonnene Energie in Superkondensatoren.

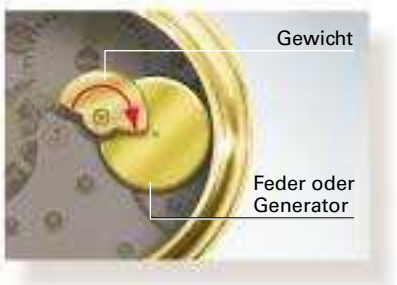
▶ Der **Mikroprozessor** einer Zehn-Euro-Digitaluhr besitzt mehr Rechenleistung als der Prozessor des Apple II, der 1980 dem heutigen PC den Weg ebnete. Der amerikanische Uhrenhersteller Timex beschäftigte damals nicht einen Software-Ingenieur, heute gehören mehr als die Hälfte der Angestellten zu dieser Berufsgruppe.

▶ Winzige **Stimmgabeln aus Quarz** erzeugen auch den Takt für allerlei elektronisches Gerät, vom Computerchip über den Satellitenempfänger bis hin zum Synthesizer.

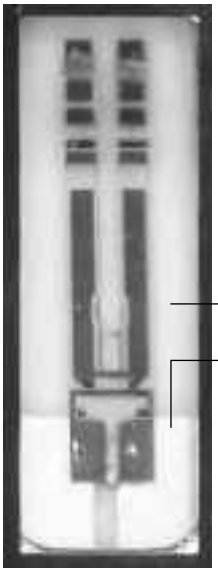
Analoge Quarzuhren verwenden dasselbe Prinzip wie ihre digitalen Verwandten, doch ein spezieller Schaltkreis setzt die Schwingungszahl auf zwei pro Sekunde herunter. Damit wird ein Schrittmotor an- und abgeschaltet, der den Sekundenzeiger betätigt.



Das Aufziehen einer mechanischen Uhr spannt eine Spiralfeder, eine so genannte Hemmung erlaubt deren Entspannung nur in kleinen Schritten. Diese wiederum versetzen das Rad einer Unruh in Schwingung.



Automatische beziehungsweise selbstaufziehende mechanische Uhren nutzen ein kleines Gewicht, das bei Armbewegungen beschleunigt wird, um eine Spiralfeder aufzuziehen oder mittels eines winzigen Generators elektrische Spannung zu erzeugen, die wiederum einen Schwingquarz antreibt.



Ein Schwingquarz wird durch einen fotolithografischen Ätzprozess in Form einer winzigen Stimmgabel gefertigt, die eine stabile Schwingung liefert.

KENT SNODGRASS PRECISION GRAPHICS / QUELLE: SWATCH GROUP UND TIMEX

Ein Handy als Internetstation und Unterhaltungsmedium? Diese Zukunftsvision lässt sich dann sinnvoll umsetzen, wenn flexible Bildschirme auf dem Markt sind. Sie werden bei Bedarf aus dem Gerät gezogen und sind auch als Touchscreens geeignet.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Displays von der Rolle

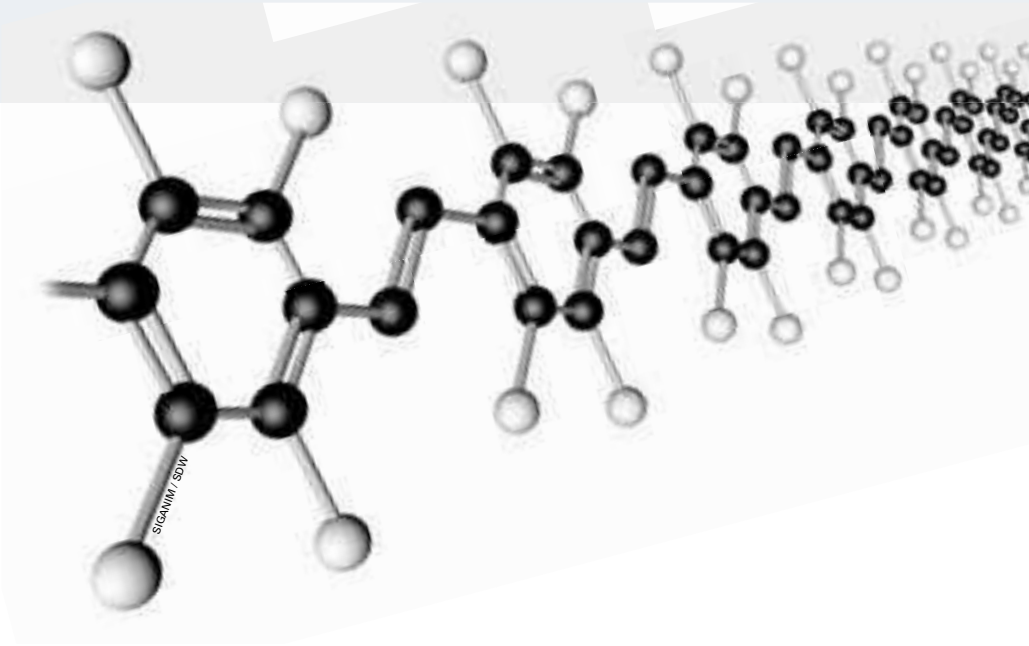
Leuchtdioden aus Kunststoff schicken sich an, unseren Alltag zu verändern.

Von Bernhard Gerl

Es scheint grotesk: Da hat man sich für teures Geld einen Beamer geleistet, um Heimkino auf der Höhe der Zeit zu erleben oder Kunden Geschäftsideen nahe zu bringen, doch ein Teil der Technik stammt noch aus der Stummfilmzeit: die Projektionsleinwand. Einen wirklichen Ersatz gibt es nicht, denn Monitore, ob ein Plasma-, LED- oder Kathodenstrahlbildschirm, bieten kein so großes Format und sind nicht flexibel zu verstauen. Doch das wird sich ändern, sobald OLEDs *(organic light emitting diodes)* die in sie gesetzten Erwartungen erfüllen.

Und das ist nicht wenig: OLED-Displays sollen heller sein als die von Laptops her bekannten Flachbildschirme und dabei noch weniger Energie verbrauchen. Denn deren Bildpunkte (Pixel) basieren auf Flüssigkristallen (*liquid crystal display*, LCD), die so angesteuert werden, dass sie das Licht einer Hintergrundbeleuchtung sperren oder nach vorne durchlassen. Deshalb sieht der Betrachter auch nur dann ein helles Bild, wenn er direkt vor dem LCD-Schirm sitzt. OLEDs aber leuchten selbst, strahlen also hell in alle Richtungen.

Der besondere Reiz der neuen Displays liegt aber vor allem in der guten



Das Polyphenylenvinylen (PPV) besteht aus einer linearen Polymerkette. Jedes Kohlenstoffatom ist mit zwei oder drei Nachbarn verbunden, wobei sich Einfach- und Doppelbindungen abwechseln. Dabei teilen sich die Kohlenstoffatome ein oder mehrere Elektronenpaare. Wird ein solcher Ladungsträger entnommen, bleibt vor dem Hintergrund der zuvor elektrisch neutralen Kette ein positives Loch zurück.

Verarbeitbarkeit des Grundmaterials Kunststoff und dem einfacheren Aufbau. Auf Komponenten wie Hintergrundbeleuchtung, Polarisatoren oder Farbfilter kann bei OLEDs verzichtet werden. Auch sind beliebige Formate denkbar. Werden Computer oder Fernseher ausgeschaltet, rollt sich der Monitor unauffällig ein. Die transparenten Folien könnten auf Windschutzscheiben die Angaben des Armaturenbretts und des Navigationssystems auf Augenhöhe zeigen. Oder würden selbst zum Schmuck: Das Display eines Handys ließe sich wie ein Armband tragen, der Bilderrahmen im Wohnzimmer zeigte eine Videoinstallation statt ein Gemälde. Zu guter Letzt eignen sich OLEDs natürlich auch als Leuchtelemente, die in der U-Bahn den Weg weisen oder ganze Wände verkleiden.

Nahziel: drei Milliarden Euro Umsatz

Der Fokus der industriellen Entwicklung liegt derzeit vor allem auf kleinen Displays mit geringem Energieverbrauch. Schon vor zwei Jahren brachten Kodak und Sanyo gemeinsam einen nichtflexiblen OLED-Bildschirm für Digitalkameras und Mobiltelefone auf den Markt; Pioneer bietet ein Autoradio mit Polymer-Display an, Osram-OS will mit der Marke »Pictivia« vor allem Klapptelefone, Autoradios und Haushaltsgeräte ausrüsten und hat vor kurzem in Penang (Malaysia) eine Anlage zur Fabrikation kleiner gelbgrün leuchtender OLED-Anzeigen in Betrieb genommen, geplante Jahresproduktion: 30 000 Quadratmeter. Der Weltmarkt für solche Displays lag 2003 noch bei etwa 232 Millionen Euro, bis 2009 soll er bereits mehr als drei Milliarden Euro erreichen, so prophezeit es das auf den Bildschirmmarkt spezialisierte amerikanische Marktforschungsunternehmen iSuppli/Stanford Resources.

Wie es die Bezeichnung *organic light emitting diodes* schon sagt, basieren diese Leuchtdioden auf organischen, das heißt aus Kohlenstoffverbindungen bestehenden Materialien. Davon gibt es zwei Varianten: zum einen niedermolekulare, also aus ein paar Dutzend Atomen bestehende Stoffe, zum anderen langkettige Polymere aus etlichen tausend Atomen, also das, was wir gemeinhin unter Kunststoff verstehen. In letztem Falle spricht man zur Unterscheidung auch von der PLED *(polymer light emitting diode)*.

Jede Leuchtdiode, ob aus Silizium oder Kohlenstoffverbindungen, besteht aus Schichten von Halbleitern, also Materialien, deren elektrische Leitfähigkeit zwischen denen von Metallen und Isolatoren liegt. Diese Eigenschaft basiert auf der mehr oder weniger guten Verfügbarkeit freier Elektronen für die Stromleitung. In einem Metall überlappt der gebundene Zustand (das so genannte Valenzband) energetisch mit dem der ungebundenen Ladungsträger (dem Leitungsband), in einem Isolator liegen beide so weit auseinander, dass die Elektronen immer im Gitter des Festkörpers verankert bleiben – es kann kein Strom fließen. Bei einem Halbleiter ist die Energiedifferenz sehr klein, sodass eine geringe Energiezufuhr Elektronen in das Leitungsband befördert. Zurück bleiben dann »Löcher«, die ihrerseits quasi als Träger positiver Ladung durch das Material wandern können.

Die hier verwendeten organischen Moleküle sind durch Einfach- und Doppelbindungen so strukturiert, dass sich ein zusätzliches Elektron beziehungsweise Loch innerhalb eines solchen Mo- ▷

Herstellungsverfahren

OLED *(organic light emitting diode)*
Für Displays aus OLEDs wird das organische Material auf eine mit ITO als durchsichtigem Leiter überzogene Glasplatte aufgedampft. Es eignen sich deshalb nur relativ kleine Moleküle, die durch die 300 Grad Hitze beim Verdampfen nicht zerstört oder verändert werden. Meist tragen sie Benzolringe, die je nach Modifikation in unterschiedlichen Farben leuchten. Eine Maske über der Glasplatte steuert, wo genau sich das Material niederschlägt. Ein Hochvakuum verhindert Verunreinigungen und verbessert so die Lebensdauer des Produkts.

PLED *(polymer light emitting diode)*
Polymere Materialien lassen sich aufbringen. Verbreitet ist das so genannte *spin coating*: Ein Tropfen der Kunststofflösung verteilt sich auf einer schnell rotierenden Platte auf Grund der Zentrifugalkräfte sehr gleichmäßig. Alternativ wird die Flüssigkeit beim »Rakeln« mit einem scharfen Schaber verteilt. Ist das Lösungsmittel verdampft, bleibt eine Kunststoffschicht zurück. Ihre Moleküle werden mit Hitze oder Licht vernetzt, die Schicht somit stabilisiert. Die verwendeten Materialien haben so komplizierte Bezeichnungen wie Polyphenylenvinylen (PPV), Poly-(p-phenylen) (PPP) oder MEH-DOO-PPV. PPV leuchtet grün, PPP blau, MEH-DOO-PPV rot. Die Entwickler können den Farbton einstellen, indem sie die Moleküllänge und die Verzweigungen in den Ketten variieren.

UNIVERSAL DISPLAY CORPORATION

Dieser Prototyp eines flexiblen Videobildschirms der amerikanischen Firma Universal Display demonstriert den Stand der Technik.

▷ leküls frei bewegen kann. Es hüpft auch relativ leicht von einer Polymerkette zur nächsten. Aus der Sicht des Chemikers entspricht ein Transport von Elektronen einer Oxidation, der von Löchern einer Reduktion des Moleküls.

Die Ladungsträger werden von Elektroden in die organische Schicht »injiziert«. Dazu müssen die Kontaktmaterialien so gewählt werden, dass die Ladungsträger jeweils keine Energiebarriere zu überwinden haben. In Silizium und anderen klassischen, mineralischen Halbleitern lässt sich die Ladungsträgerkonzentration zudem durch den Einbau von Fremdatomen steuern. Man spricht von n- und p-Dotierung, je nachdem, ob diese Atome zusätzliche Elektronen oder Löcher mitbringen.

Dieses Konzept versuchen Forscher der TU Dresden gemeinsam mit der Firma Novaled sowie dem Fraunhofer Institut für Photonische Mikrosysteme in Dresden gerade auch auf organische Halbleiter zu übertragen – die Bauteile ließen sich dann mit noch kleineren Spannungen betreiben. Die Wissenschaftler haben dazu jedes hundertste Halbleitermolekül durch eines ersetzt, das schon bei sehr geringer Anregung – etwa durch die Umgebungswärme – Elektronen an seine Nachbarn abgibt oder von ihnen aufnimmt. Analog zum Silizium sprechen sie auch hier wieder von n- und p-Dotierung. Der kürzlich präsentierte Prototyp von Novaled hält den Weltrekord für die niedrigste OLED-Betriebsspannung.

Anders als etwa Transistoren sollen Leuchtdioden nicht Ströme schalten, sondern Licht erzeugen. Das geschieht, wenn Elektronen und Löcher rekombinieren und die so entstandenen Elektronen-Loch-Paare strahlend zerfallen. Die Energiedifferenz zwischen Valenz- und Leitungsband wird dann als Photon abgestrahlt. Seine Wellenlänge entspricht in erster Näherung der Lücke zwischen Valenz- und Leitungsband. Um sichtbares Licht abzugeben, muss die Energiedifferenz etwa zwei bis drei Elektronenvolt betragen. Ein Photon von 1,9 Elektronenvolt entspricht rotem, 2,4 Elektronenvolt grünem und 2,8 Elektronenvolt blauem Licht.

Im einfachsten Fall besteht eine OLED aus zwei elektrisch leitenden Schichten mit einem organischen Halbleiter dazwischen. Dieses einfache Bauelement ist aber wenig effizient, weil die meisten Elektronen unbehelligt durch den gesamten Halbleiter wandern. Besser sind deshalb mehrere aktive Schichten. In einer herrscht Elektronenüberschuss, in einer anderen -mangel. Wo beide aufeinander treffen, müssen Elektronen und Löchern »rekombinieren«.

Dabei entsteht ein angeregter Zustand, ein so genanntes Exziton. In 25 Prozent aller Fälle zerfällt es wie gewünscht, indem das organische Molekül in den Grundzustand zurückkehrt und dabei ein Photon abstrahlt. Bei den restlichten 75 Prozent geht Energie verloren, weil der Eigendrehimpuls (Spin) der beteiligten Elektronen einen Wert hat, den ein Photon nicht »abtransportieren« kann. Dann entlässt das Exziton das Elektron einfach wieder oder gibt die Energie als Wärme an die Umgebung ab. Inzwischen haben die Forscher dieses Problem aber in den Griff bekommen: Sie bauen Schwermetalle wie Platin oder Iridium in den Halbleiter ein. Deren Elektronen passen sozusagen den Eigendrehimpuls des eingefangenen Ladungsteilchens an (der Spin wird dabei umgekehrt) und die Lichtausbeute steigt auf fast 100 Prozent.

Ein erheblicher Teil der Entwicklungsarbeit befasst sich mit dem Problem, Elektronen effizient in die Halbleiterschichten einzuspeisen und abzuführen. Die Anode, die Elektronen aufnimmt (beziehungsweise Löcher injiziert), muss aber nicht nur sehr leitfähig, sondern auch hochtransparent sein – das erzeugte Licht soll ungehindert austreten. Indium-Zinn-Oxid (ITO) hat sich hier weit gehend durchgesetzt. Als zusätzliche Schicht gleicht Polyanilin

(PANI) Unebenheiten im ITO aus und erleichtert das Austreten der Elektronen aus dem organischen Halbleiter. Zudem verhindert es, dass Indium- oder Zinn-Ionen in den Halbleiter gelangen.

Das Material der negativen Elektrode (Kathode) muss Elektronen leicht an den organischen Halbleiter abgeben können. Die Hersteller verwenden dazu unedle Metalle wie Aluminium, Magnesium-Silber-Legierungen oder Kalzium. Als Träger dient heute noch eine dünne Glasscheibe, künftig sollen aber auch biegsame Folien etwa aus Polyester möglich sein. Denn: Kunststofffolien schützen die organischen Leuchtmittel noch nicht genügend vor ihren Hauptfeinden Sauerstoff und Feuchtigkeit.

Noch verbesserungswürdig: Lebensdauer und Haltbarkeit

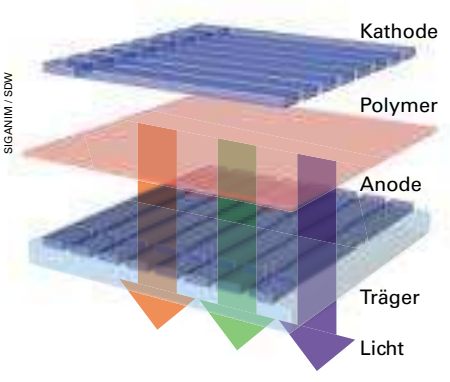
Der gesamte Herstellungsprozess läuft wie in der Chipindustrie in Reinräumen ab, damit die nur wenige hundert Nanometer dicken Schichten nicht verschmutzen. Ein Staubteilchen, auch wenn es nur ein Mikrometer groß ist, würde den Halbleiter kurzschließen. Die besten Farb-OLED-Displays kommen so immerhin schon auf eine Lebenszeit von knapp 10 000 Stunden. Ein Wert, der für verschiedene Anwendungen gerade noch zu vertreten ist.

Doch was heißt hier Lebenszeit? Eine verbindliche Norm, diese zu bestimmen, gibt es nicht. Manche Hersteller messen im Kühlraum und erzeugen dabei geringe Helligkeit – entsprechend große Haltbarkeiten können sie angeben. Doch unter normalen Nutzungsbedingungen gelten 10 000 Stunden heute als typischer Wert. Danach leuchten die Bauteile nur noch halb so hell. Wie schnell sie ihre Leuchtkraft verlieren, hängt auch von ihrer Farbe ab. Blaue schneiden dabei besonders schlecht ab und das verzerrt dann die Gesamtfarbgebung: Wo auf dem OLED-Monitor ein sattes Violett leuchten sollte, macht sich mehr und mehr Rot breit.

Bisher verwenden die Entwickler zur Ansteuerung der Pixel meist die »Passiv-Matrix-Technik«: In jedem Bildpunkt kreuzen sich eine vertikale und eine horizontale Linienelektrode. Werden beide aktiviert, leuchtet die zugehörige Leuchtdiode auf. Für kleine Anzeigen etwa bei Digitalkameras reicht das völlig, Computermonitore oder Fernseher erfordern aber die schnellere Aktiv-Matrix-Technik, bei der Transistoren die Pixel ansteuern. Vierzig solcher Bildelemente pro Zentimeter und Zeile entsprechen der üblichen Auflösung eines Bildschirms. Entsprechend aufwändig ist die Herstellung, zumal die Techniker zwei Probleme lösen müssen. Erstens sind die OLED-Pixel – anders als bei LCD-Displays – nicht spannungs-, sondern stromgesteuert. Zweitens sind die hinter dem Substrat angebrachten Steuertransistoren nicht durchsichtig. Deshalb müssen die Ingenieure den üblichen Schichtaufbau umkehren. Erste kleine Aktiv-Matrix-Displays mit dieser Technik wurden bereits vorgestellt.

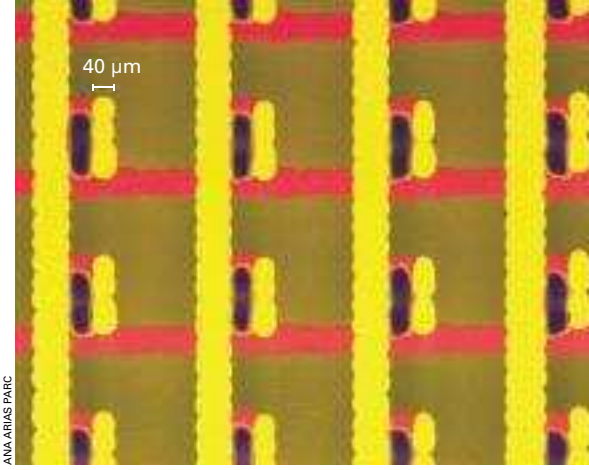
Farbige Displays wollen die Ingenieure mit einer Art Tintenstrahldrucker erzeugen (siehe Bilder oben). Der soll dann Bildpunkt für Bildpunkt das Polymer in kleine Vertiefungen im Substrat spritzen. Noch entstehen dabei allzu kugelige, ungleichmäßige Tropfen, doch die Forscher sind zuversichtlich, dieses Problem in den nächsten Jahren lösen zu können.

Leuchtdioden aus organischem Material bestehen im einfachsten Fall nur aus einer Polymerschicht, Elektroden und einem transparenten Träger. Eine höhere Lichtausbeute bieten mehrere Schichten, die Elektronen- und Lochtransport trennen.

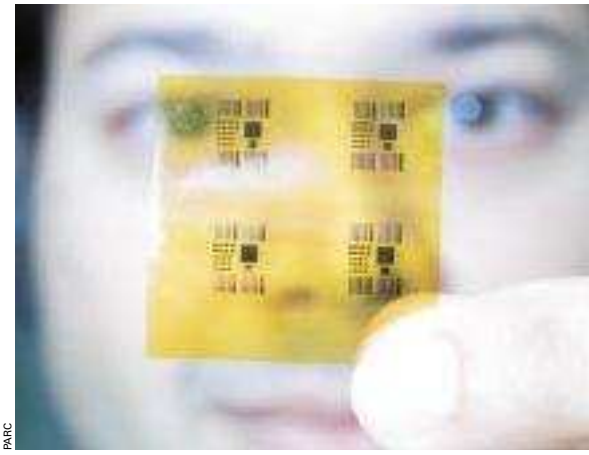


SIGANIM / SDW

Flexible Displays benötigen flexible Transistoren zur Ansteuerung der Bildpunkte. Mit einer Art Tintenstrahldrucker fertigten Wissenschaftler des Forschungszentrums Palo Alto (Kalifornien) dieses Transistoren-Array (Vergrößerung oben). Sie verwendeten eine Tinte aus einem polymeren Halbleiter des Xerox-Forschungszentrums in Kanada.



ANA ARIAS PARC



PARC

Organische Materialien erobern freilich nicht nur den Bildschirmmarkt. Auch großflächige Beleuchtungen und Solarzellen hofft man damit kostengünstig zu realisieren. Dazu haben sich farbige Kunststoffe gesellt, die zwar nicht selbst leuchten, doch ihre Farbe ändern, sobald eine elektrische Spannung anliegt. Viele Anwendungen sind prinzipiell möglich, offen bleibt die Frage, ob und wie die erforderliche Haltbarkeit zu erreichen ist. ◁

Der Physiker **Bernhard Gerl** ist freier Technikjournalist in Regensburg.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

ANZEIGE

Künstliche Biomaschinen

Sie sollen Schwermetalle abbauen, Wirkstoffe erzeugen und Krebszellen vernichten – künstliche Mikroorganismen, konstruiert von Geningenieuren. Doch vorläufig ringen die Konstrukteure noch um die Stabilität ihrer Geschöpfe.

Von W. Wayt Gibbs

Eine neue Forschungsrichtung nimmt sich den Erfindungsreichtum der Evolution zum Vorbild. In 3,6 Milliarden Jahren entstanden durch Mutation und Selektion Organismen mit einer erstaunlichen Vielfalt an Fertigkeiten. Trotzdem können natürliche Lebewesen längst nicht alles. Zwar existieren beispielsweise Bakterien, die den Sprengstoff TNT abbauen, der auch Krebs erregt. Wäre es aber nicht praktisch, wenn die Mikroben beim Abbau zugleich leuchteten, sodass sie verseuchte Böden und verborgene Landminen anzeigen würden?

Ein anderes Beispiel: Die Blätter vom asiatischen Einjährigen Beifuß *(Artemisia annua)* enthalten einen Wirkstoff gegen Malariaerreger – Artemisinin. Die chinesische Volksmedizin nutzt den Effekt seit langem. Die Pflanze bildet davon jedoch nur winzige Mengen, die Gewinnung ist also teuer. Würden Mikroben die Substanz preiswert produzieren, könnte man das Mittel Millionen von Menschen in Dritte-Welt-Ländern zugänglich machen. Krebsforscher wiederum wünschen sich sehnlichst Zellen mit einfach ablesbarem eingebautem Zählwerk für die Zahl von Zellteilungen. Auch das hat die Natur bisher nicht realisiert.

Wer meint, heutzutage könnten Gentechniker solche Wunschorganismen leicht konstruieren, der irrt. Seit nunmehr dreißig Jahren verpflanzen Wissenschaftler fremde Gene in Organismen. Dennoch gleicht die Gentechnologie immer noch eher einem Kunsthandwerk als einer ausgereiften technischen Disziplin.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Nicht alles Wünschbare schöpft die Natur aus. Der Einjährige Beifuß *(Artemisia annua)* bildet das Malariamittel Artemisinin – nur leider in geringer Menge. Kunstzellen sollen einspringen.

»Angenommen, eine Pflanze soll die Farbe wechseln – und zwar dann, wenn der Boden TNT-verseucht ist«, erläutert Drew Endy, Biologe am MIT (Massachusetts Institute of Technology) im amerikanischen Cambridge. »Also würde man an ihren genetischen Regelsystemen herumbasteln. Mit etwas Glück würde das die Pflanze nach ein oder zwei Jahren auch können. Damit habe ich aber nur genau dieses sehr spezielle System. Das hilft nicht weiter, wenn ich danach eine Zelle konstruieren möchte, die etwa im Blut herumschwimmt und verkalkte Arterienwände reinigt – oder wenn ich Zellen in Mikrolinsen verwandeln will. Gegenwärtig steht jede Neukonstruktion noch weit gehend für sich.«

Die Kunst der Ingenieure

Endy gehört zu jener kleinen, rasch wachsenden Forschergemeinde, die sich vorgenommen hat, aus der Gentechnik eine »synthetische Biologie«, wie sich der neue Wissenschaftszweig nennt, zu entwickeln. Wer auf diesem Feld arbeitet, entwirft und konstruiert lebende Systeme. Die neuen Schöpfungen sollen sich vorhersagbar verhalten. Zu dem Zweck verpassen die Forscher ihnen definierte genetische Module, die sich nach Bedarf austauschen lassen. Manche dieser Laborwesen könnten sogar mit einem erweiterten genetischen Code arbeiten, dank dessen sie Dinge tun würden, die in der Natur nie da gewesen waren.

Die synthetische Biologie verfolgt insbesondere drei Ziele. Erstens möchten die beteiligten Wissenschaftler Grund-

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

züge des Lebens erkennen, indem sie es aus kleinen Bauelementen synthetisieren – und nicht, indem sie nach eher üblicher Art vorhandenes Leben in seine Bestandteile zerlegen. Zweitens soll die Gentechnologie zu einer echten Ingenieurwissenschaft werden – also zu einer technischen Disziplin, in der Geningenieure standardisierte Komponenten verwenden, aus denen sie immer wieder neue, komplexere Systeme entwickeln. Drittens möchten diese Wissenschaftler die Grenzen von lebenden und technischen Systemen einander annähern, bis sich deren beider Eigenschaften überschneiden. Das ergäbe programmierbare Organismen, quasi lebende Maschinen.

Einzelne dieser Visionen rücken schon in greifbare Nähe – etwa bakterielle TNT-Detektoren oder Mikroorganismen als Fabriken für das Malariamittel Artemisinin. Die derzeitigen Prototypen sehen zwar noch recht schlicht aus. Doch dahinter steht eine hochambitionierte Vision: »Leben Ausgabe zwei«, oder in Computersprache »Version 2.0«.

Künstliche Zellen sollen künftig auch Landminen aufspüren – die, wie hier in Angola, besonders unter der Zivilbevölkerung von Kriegsgebieten viele Opfer fordern (oben). Wie die Kunstwesen geschaffen werden könnten, erproben Bioingenieure unter anderem, indem sie Viren aus den einzelnen Funktionselementen neu zusammensetzen.

BRYAN CHRISTIE DESIGN; OBEN: LAIF / U.LUTUNCOK

Die Anfänge dieser synthetischen Biologie liegen fünfzehn Jahre zurück. Ein Team um Steven A. Benner, der jetzt an der Universität von Florida in Gainesville arbeitet, konstruierte 1989 an der ETH Zürich eine DNA mit vergrößertem Alphabet. Die neue Form von Erbsubstanz wies neben den üblichen vier genetischen »Buchstaben« (Nucleinsäurebasen), die als Dreiersilben für die Bausteine der Proteine codieren, zusätzlich zwei künstliche Basen auf. Seitdem schufen Benner wie auch andere Wissenschaftler weitere Sorten von solcherart erweiterter DNA.

Funktionsfähige Gene für lebende Zellen konnte damit zwar noch niemand herstellen – also Erbsequenzen, die in eine ▷

RNA-Matrize abgelesen und daran dann in Proteine übersetzt werden. Doch im letzten Jahr entwickelte die Gruppe um Peter G. Schultz am Scripps-Forschungsinstitut in La Jolla (Kalifornien) Zellen, die zwar normale DNA enthalten, mit ihr aber unnatürliche Aminosäuren herstellen. Mit diesem Material gelang es bereits, neuartige Proteine zu knüpfen.

Benner und manche seiner Kollegen sehen die Bedeutung solcher Kunstgenetik darin, Grenzfragen zu erforschen wie die nach dem Ursprung des irdischen Lebens oder nach möglichen anderen Lebensformen im Universum. Wirkliches Aufsehen erregte die synthetische Biologie allerdings erst, als andere Forscher verkündeten, sie würden neue Maschinen bauen, die in Zellen arbeiten. Im Jahr 2000 kamen zwei solche Systeme gleichzeitig an die Öffentlichkeit. Das beflügelte diese Wissenschaftsrichtung und gab für einen Großteil der Projekte in den vergangenen Jahren den Anstoß.

Bakterien, die auf Wunsch blinken

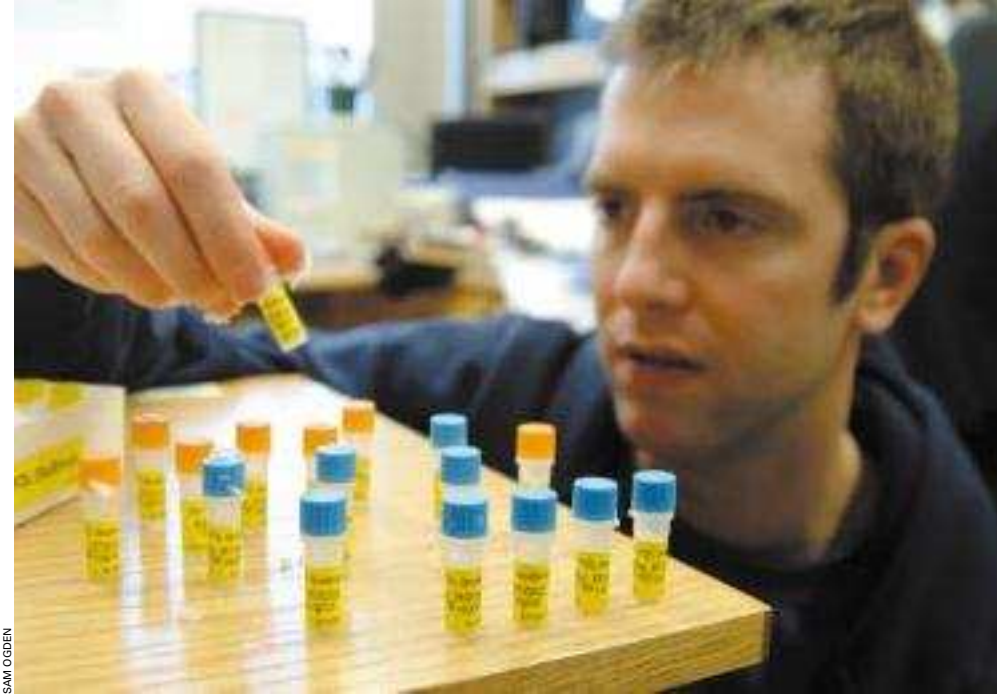
In beiden Fällen benutzten die Forscher das normalerweise unschädliche Darmbakterium *Escherichia coli*, dem sie neue DNA-Module übertrugen. Michael Elowitz und Stanislaus Leibler, damals an der Universität Princeton (New Jersey), schalteten drei Gene so zusammen, dass die Bakterien in regelmäßigen Abständen aufleuchteten (Kasten S. 71). James J. Collins, Charles R. Cantor und Timothy S. Gardner von der Universität Boston (Massachusetts) konstruierten einen Schalter, der auf jedes Eingangssignal hin seinen Zustand wechselt (ein »Flipflop«). Mit zwei Genen, die sich gegenseitig hemmen – eine negative Rückkopplungsschleife – schalten die Mikroben zwischen zwei unterschiedlichen stabilen Zuständen hin und her. Ein Flipflop ist der wesentliche Bestandteil einer Speicherzelle.

So freudig ingenieurtechnisch orientierte Biologen diese Erfindungen begrüßten, so sehr wurden sie dann frustriert. Den Flipflop-Schalter zu konstruieren hatte ein ganzes Jahr gedauert. Für die blinkenden Bakterien hatten Gentechniker sogar zwei Jahre gebraucht. Nun aber gelang es nicht, die beiden Systeme zu kombinieren – also etwa Zellen herzustellen, deren Blinken sich nach Bedarf an- und abstellen ließ.

»Das ist unser Ziel: aus definierten, wunschgemäß arbeitenden Modulen biologische Systeme zu konstruieren, die sich vorhersagbar verhalten«, erläutert Endy. »Wenn mich dann jemand um ein Bakterium bittet, das bis dreitausend zählt und darauf nach links schwimmt, müsste ich nur die entsprechenden Elemente aus dem Regal nehmen und zusammenbringen.« Vor vier Jahren war das noch Zukunftsvision. Heute kann Endy bereits eine Schachtel mit über fünfzig Röhrchen vorzeigen, in denen er solche Bausteine in einer Flüssigkeit aufbewahrt.

»Das hier sind alles genetische Versatzstücke, Module«, erklärt er dazu. »In jedem Gefäß stecken die Kopien von einem anderen eigens komponierten Stück DNA. Wir nennen sie BioBricks.« Der Name spielt auf das englische Wort für Ziegel- oder Bausteine an. »Manche Module«, so Endy weiter, »agieren selbstständig, andere verhelfen Zellen zur Produktion eines Proteins. Jeder BioBrick ist mit den übrigen kompatibel.« Das gilt in zweierlei Hinsicht. Einerseits, auf technischer Ebene, lässt sich jedes Modul eigenständig fertigen und aufbewahren. Später können Geningenieure es dann mit anderen BioBricks zusammenmontieren. Andererseits, auf funktioneller Ebene, ist jedes Modul so ausgelegt, dass es standardisierte Signale sendet und empfängt. Der Wissenschaftler kann also das Verhalten einer Konstruktion aus BioBricks einfach dadurch verändern, dass er einzelne Module austauscht.

»In anderen Sparten der Ingenieurwissenschaften sind austauschbare Komponenten längst selbstverständlich«, kommentiert Endy. Die Gentechnologie beginnt erst damit, die Möglichkeiten eines modularen Konzepts auszuloten. Standardisierung bietet unter anderem den Vorteil, dass man als Wissenschaftler nur allgemein wissen muss, was der einzelne BioBrick leistet. Das heißt, man kann die Funktion als solche abstrakt betrachten. Ein Elektroingenieur, der einen Kondensator in einen Schaltkreis integriert, muss



SAM OGDEN

Am MIT in Cambridge (USA) konstruieren Drew Endy und seine Kollegen genetische Module für definierte Funktionen. Mit solchen vorgefertigten »BioBricks« können Biologen dann neue genetische Schaltkreise zusammenstellen, die sie in Zellen einbauen.

IN KÜRZE

- Die **synthetische Biologie** will neue Organismen kreieren beziehungsweise vorhandene verändern. Anders als die Molekularbiologie, in der man Lebensvorgänge vor allem ergründet, indem man die Systeme in ihre Komponenten zerlegt, wählt die synthetische Biologie den umgekehrten Weg: Die Forscher entwerfen Versatzstücke, so genannte **BioBricks**, die sie zu **neuen Systemen** zusammenfügen. Diese arbeiten dann in lebenden Zellen.
- Solcherart ausgerüstete **Mikroorganismen** produzieren Medikamente oder filtern Gifte, zeigen Gefahren an und vollführen einfache **formallogische Operationen**.

dessen inneren Aufbau nicht verstehen. Ähnlich sollen Bioingenieure in Zukunft genetische Schalter in ihren Systemen verwenden können, ohne den genauen biochemischen Aufbau und die Funktionsweise von deren genetischen Bestandteilen zu durchschauen – als da sind Promotoren, Repressoren, Aktivatoren oder Induktoren.

Eines der Röhrchen in Endys Schachtel enthält einen »Inverter« – ein Modul, das die logische Operation »NICHT« (NOT) durchführt: Bei starkem Eingangssignal liefert das Modul ein schwaches Ausgangssignal und umgekehrt. Ein anderer der BioBricks leistet die Funktion »UND« (AND). Er weist zwei Eingänge auf. Nur wenn beide ein starkes Signal empfangen, erzeugt das Modul ein Ausgangssignal. Da die Signale der beiden Versatzstücke miteinander kompatibel sind, kann man diese BioBricks kombinieren. Das ergibt die Operation »NICHT UND« (NAND). Schaltet man genügend NAND-Operatoren zusammen, lässt sich im Prinzip jede beliebige binäre Operation realisieren.

Prinzip Baukasten

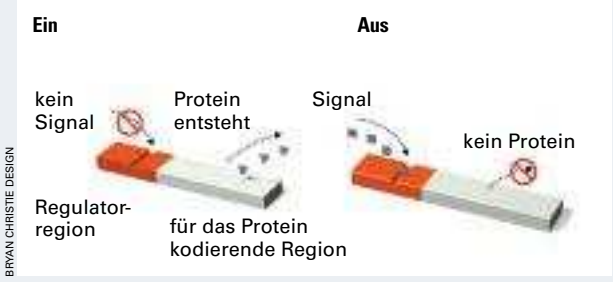
Standardisierte BioBricks erlauben zudem, damit funktionelle genetische Systeme zu bauen, ohne im Einzelnen zu wissen, wie man sie technisch zusammenfügen muss. So hatte im Jahr 2003 am MIT ein Studentenkurs die Aufgabe, genetische Programme zu entwerfen, damit blinkende *E.-coli*-Bakterien gleichzeitig leuchten – wie manchmal Glühwürmchen. Binnen eines Monats legten die 16 Teilnehmer dazu vier verschiedene Konzepte vor. Dass die Studenten von DNA-Synthese nichts verstanden, machte nichts. Endy bestellte die 58 Komponenten, die sie für ihre Entwürfe benötigten, bei einem kommerziellen DNA-Syntheselabor. Nun ergänzen die neuen BioBricks das MIT-Register biologischer Standardkomponenten. Die Liste enthält inzwischen weit über hundert Module. Jeden Monat kommen neue hinzu.

So fruchtbar sich Konzepte der Ingenieurwissenschaften erweisen – an einem bestimmten Punkt endet die Analogie zwischen Technik und Biologie. Elektri- ▷

Blinker aus der Retorte

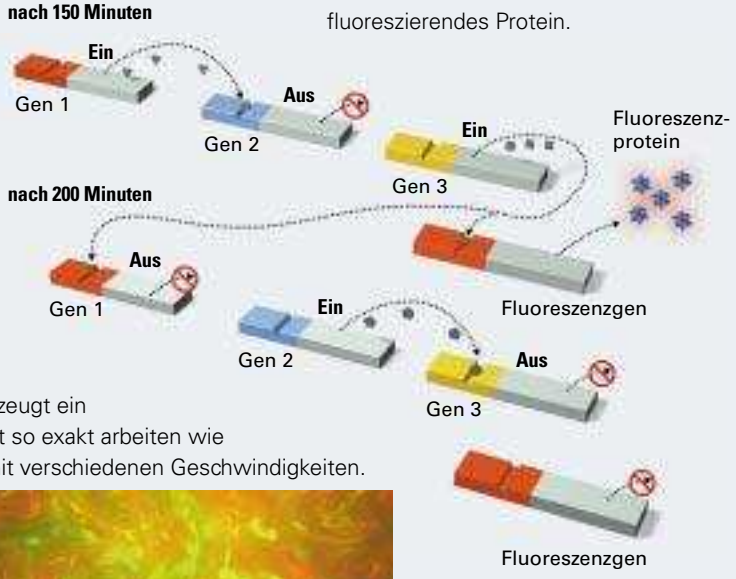
Genetische Abschnitte werden so zusammengefügt, dass sie logische Operationen ausführen. Im Idealfall arbeiten sie ebenso zuverlässig wie elektronische Schalkreise.

Schalter: Dieser biochemische Inverter führt die Operation »NICHT« aus. Wenn er kein Signal empfängt, stellt er auf »Ein«: Dann wird ein Protein hergestellt (links). Erhält er ein Signal, stellt er auf »Aus« (rechts).

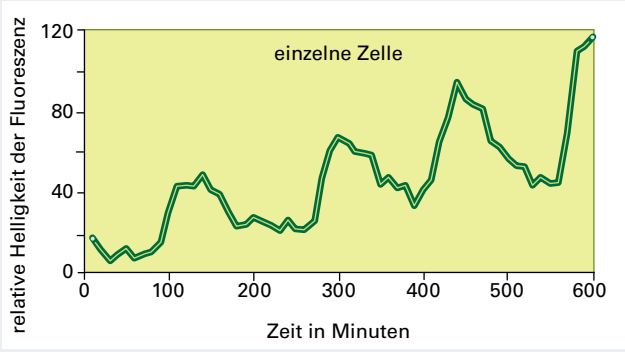


BRYAN CHRISTIE DESIGN

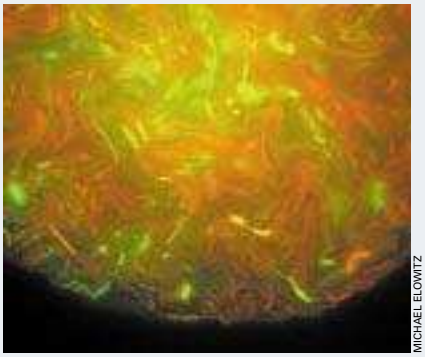
Schaltkreis zum Blinken: Dieser einfache Schaltkreis lässt eine Zelle oszillierend aufleuchten. Das System enthält drei Inverter wie links beschrieben; der erste hemmt den zweiten, der zweite den dritten und der dritte den ersten, alles mit einem gewissen Zeitverzug, sodass eine Welle der Aktivität im Kreis über die drei Stationen läuft. Der dritte Inverter steuert außer dem ersten Inverter auch ein Gen für ein fluoreszierendes Protein.



Blinkende Bakterien: Eine einzelne Zelle mit dem neuen Modul erzeugt ein regelmäßiges Blinkmuster (Grafik). Da genetische Schaltkreise nicht so exakt arbeiten wie elektronische, blinken verschiedene Bakterien in einer Population mit verschiedenen Geschwindigkeiten.



LUCY READING



MICHAEL ELOWITZ

▷ sche und mechanische Maschinen sind im Prinzip abgeschlossene Einheiten. Gleiches gilt jedoch nur für wenige genetische Systeme. Beispielsweise erfand Milan Stojanovic von der Columbia-Universität in New York einen Satz von DNA-ähnlichen Molekülen, die miteinander ähnlich wie bei dem Spiel »Stein/Schere/Papier« verfahren. Die synthetische Biologie allerdings strebt vor allem nach genetischen Konstruktionen für lebende Zellen. Diese Forscher wollen Systeme, die sich bewegen, sich vermehren und mit der richtigen Welt interagieren.

Nun sind die neuen Konstrukte für eine Zelle Parasiten. Sie schmarotzen Energie und Rohstoffe und bedienen sich der zellulären Infrastruktur für die Proteinproduktion. Als noch störender erweist sich, dass die Wirtszelle in beträchtlichem Maß Komplexität beisteuert. Für Computermodelle des internen Stoffwechsels von *E. coli* und anderen einfachen Organismen benötigten Biologen Jahre (siehe Spektrum der Wissenschaft 11/2001, S. 54). »Und trotzdem«, gesteht Ron Weiss von der Princeton University, »könnte ich nicht vorhersagen, was ein Bakterium mit einem DNA-Konstrukt täte.« Endy bestätigt das: »Die Hälfte unserer sechzig Module aus dem letzten Jahr konnten wir erst nicht verwenden. Die Zellen starben, wenn sie sich teilen wollten. Es überforderte sie, das zusätzliche genetische Material mitzuschleppen und zu vervielfältigen. Also mussten wir die Bürde irgendwie reduzieren.« Bis auf zwei Module kamen die Mikroben schließlich mit allen neuen BioBricks zurecht.

Gensysteme zum Einschmuggeln

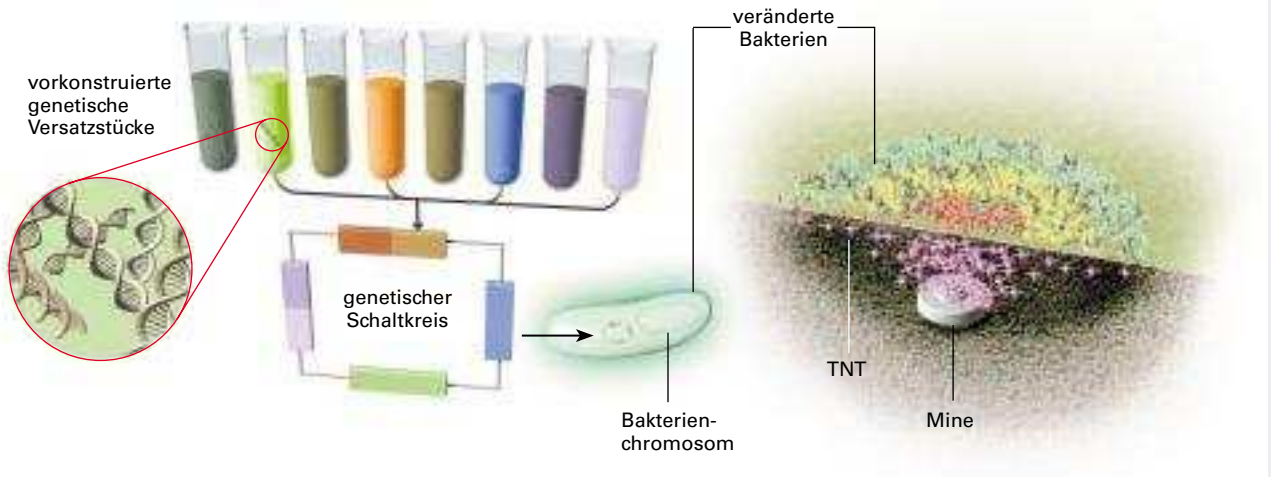
Erträglicher wird die Bürde, wenn man sie nicht dem zelleigenen Genom auflastet, sondern das Kunstprodukt auf einem eigenen DNA-Ring, einem so genannten Plasmid, deponiert. Die Ideallösung ist das aber noch nicht. Zellen nutzen für biochemische Abläufe eben keine Kabel, sondern das nasse Element. Mit »Wetware« zu arbeiten bedeutet, dass viele Signale diffus streuen. Endy gibt ein Beispiel: »Sagen wir, eine Zelle trägt für einen bestimmten Zweck einen künstlichen Inverter aus DNA und Proteinen. Nun kommt ein Signal, das ihn steuern soll – in dem Fall ein Protein. Leider reagieren andere gleichartige Inverter auf das Signalprotein genauso, wo immer in der Zelle sie sitzen, obgleich man sie eigentlich für andere Zwecke benutzen möchte.« Dabei ist es letztlich unerheblich, ob die Inverter in einem künstlichen Plasmid liegen oder auf dem natürlichen Bakterienchromosom.

Eine Möglichkeit, solche Streuung zu umgehen, besteht darin, das gleiche Modul in einer Konstruktion nicht zweimal zu verwenden. Diesen Ansatz wählte Weiss für ein genetisches Regelsystem, das Bakterien nur bei einer bestimmten Konzentration eines aufzuspürenden Stoffes – also etwa TNT – leuchten lässt (siehe Kasten unten), aber weder bei einer höheren noch einer niedrigeren. Neben vielen anderen Bestandteilen baute Weiss in das System vier verschiedene Inverter ein. Jeder davon reagiert auf ein anderes Proteinsignal. Allerdings macht es diese Stra-

Ein genetischer Minendetektor

Wo Bakterien den Sprengstoff TNT aufspüren, sollen ihre mit einem Erkennungs- und Anzeigesystem ausgestatteten Populationen wie Blütenrosetten mehrfarbig aufleuchten. Bei jeder Konzentrationsstufe des Sprengstoffs würde eine andere Fraktion der in den Boden ausgebrachten lebenden Maschinen fluoreszieren – jede in einer eigenen Farbe.

Aus genetischen Fertigbausteinen (hier in den Reagenzgläsern) könnten Bioingenieure Minensuchmaschinen konstruieren. Die Bakterien leuchten in verschiedenen Farben: Ein Typ würde beispielsweise rot fluoreszieren – und zwar nur bei hoher TNT-Konzentration im Boden –, ein anderer gelb bei mittlerer, ein dritter grün bei niedriger Verseuchung. Am Muster ließe sich genau erkennen, wo die Mine liegt. Das Erkennungssystem für mittlere Konzentrationen sieht vier Module vor: einen Sensor, je ein Element für einen oberen und unteren Schwellenwert und einen Inverter (siehe Darstellung auf der rechten Seite). Jedes der vier Module reagiert auf hohen und niedrigen Signalinput unterschiedlich. Der dargestellte Detektor würde bei einer TNT-Konzentration von vier Prozent beispielsweise gelbes Licht erzeugen.



BRYAN CHRISTIE DESIGN

tegie der Vielfalt wesentlich schwieriger und aufwändiger, Systeme mit austauschbaren Modulen zu entwerfen.

Endy ersann daher eine andere Konstruktion, die für manche Systeme die bessere Lösung sein könnte: »Unser System arbeitet mit denselben Komponenten wie das von Weiss, nur sind die Versatzstücke anders angeordnet. Der Inverter nutzt als Eingangssignal nicht Proteine, sondern die Transkriptionsrate – wie oft ein RNA-Molekül pro Sekunde an der DNA abgeschrieben, transkribiert wird. Er erzeugt ein Protein, das seinerseits die Output-Transkriptionsrate bestimmt, indem es ein zweites Gen anwirft. Wir sprechen von Tips (Transkriptionsinitiierungen pro Sekunde). Sowohl Input als auch Output des Systems sind also Tips, die gemeinsame Währung der BioBricks – wie in elektrischen Schaltkreisen der Strom.«

Im Prinzip ließe sich der Inverter durch jeden anderen BioBrick ersetzen, der Tips liefert. Auch sind Tips-Signale ortsspezifisch. Man kann das gleiche Modul an verschiedenen Stellen des Systems einsetzen, ohne dass sich die Kopien gegenseitig stören.

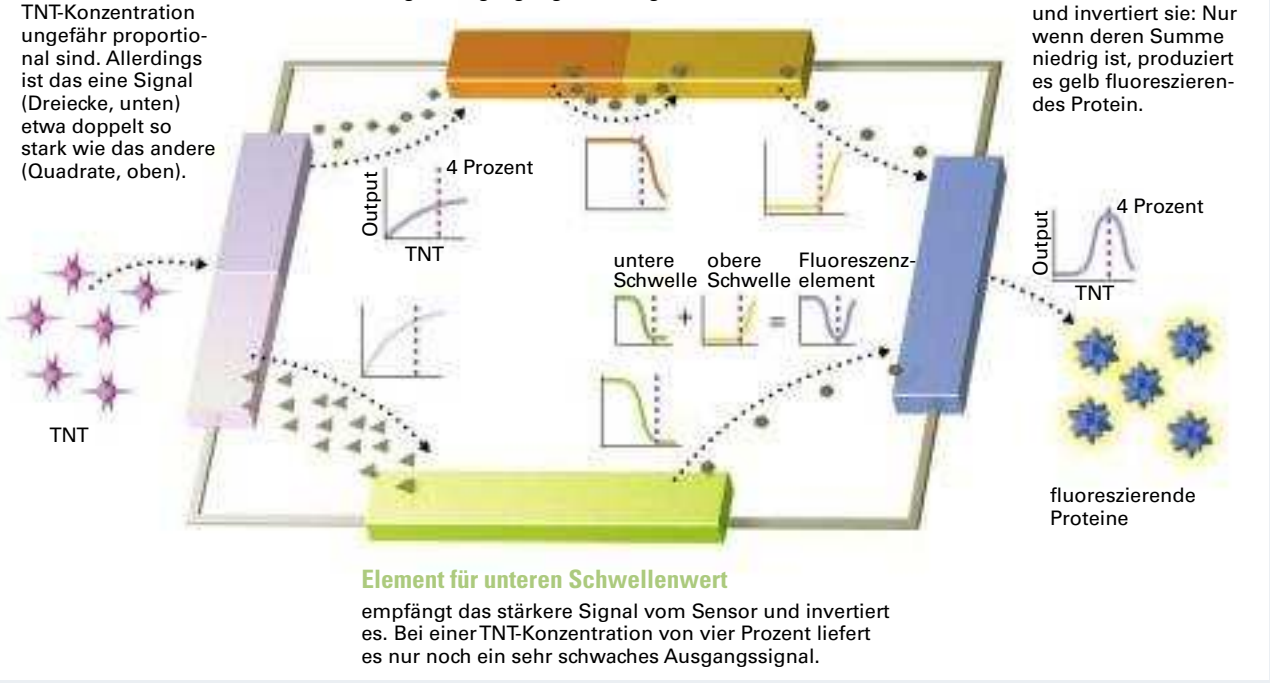
Das Verfahren soll sich nun an neuerlich von MIT-Studenten entworfenen genetischen Systemen bewähren. Der Kurs muss diesmal Konstruktionen austüfteln, die Bakterien veranlassen, in einer Petrischale gemeinsam geometrische Muster zu bilden. Dazu müssen die Mikroben miteinander kommunizieren, das heißt chemische Botenstoffe ausscheiden und aufspüren.

Störende Evolution

»Die neuen Systeme hatten jetzt schon den doppelten Umfang wie die Konstrukte vom ersten Kurs«, betont Endy. Um die Pläne vom ersten Kurs umzusetzen, also die Systeme tatsächlich zu bauen und in den Coli-Bakterien stabil zu etablieren, benötigten die Forscher immerhin 13 Monate. Inzwischen ist jedoch das Inventar an BioBricks gewachsen. Auch gelingt dank neuer Techniken die DNA-Synthese nun wesentlich schneller. Hilfreich sind vor allem auch die zwischenzeitlichen Erfahrungen der Geningenieure darin, genetische Schaltkreise zusammenzubauen.

Besonders haben die Forscher stets damit zu kämpfen, dass die artifizielle DNA über viele Zellgenerationen nicht unverändert bleibt, weil das Erbgut der Wirtszelle immerfort mutiert – eine Grundeigenschaft des Lebens. »Das Kopieren der Kunst-DNA läuft alles andere als perfekt«, erklärt Weiss. »Wir bauen mit großem Aufwand genetische Schaltkreise – bloß um zu beobachten, wie die Hälfte der Zellen schon nach fünf Stunden nicht mehr tut, was sie soll. Je größer der Schaltkreis, desto schneller mutiert er bei den Zellteilungen.«

Zwar konnten Weiss und Frank Arnold vom California Institute of Technology in Pasadena genetische Systeme verbessern, indem sie die damit versehenen Zellen jeweils nach mehreren Mutationszyklen einer harten Auslese auf ihre Brauchbarkeit unterwarfen. Ohne einen solchen Selektionsdruck bleiben die Konstrukte jedoch meist nicht lange in der Zellpopulation bestehen. ▷



BRYAN CHRISTIE DESIGN

»Eine meiner derzeitigen Lieblingsideen ist eine Zelle, die nach einem Startsignal beginnt, ihre Teilungen zu zählen: 1, 2, 3 ... bis 256«, gesteht Endy. »Das ist gar nicht viel komplexer, als was wir jetzt schon machen. Damit könnten wir schnell und präzise Zellen erkennen, die sich ungehemmt teilen – also zu Krebszellen mutiert sind. Nur habe ich keine Vorstellung, wie man einen Zähler konstruieren müsste, der weiterarbeitet, auch wenn die genetische Maschinerie beim Kopieren vor einer Zellteilung Fehler macht. Möglicherweise müssen wir die Fehlertoleranz unserer Systeme erhöhen, indem wir in jede Zelle mehrere Exemplare einbauen. Oder wir müssen dafür sorgen, dass das Kunstprodukt der Wirtszelle einen Selektionsvorteil verschafft.«

Die Forscher könnten sich auch Lösungswege natürlicher genetischer Systeme anschauen. Wie etwa machen das Viren? Hier helfen womöglich Ansätze der synthetischen Biologie weiter. Im November 2003 verkündeten Hamilton O. Smith und J. Craig Venter vom Institut für alternative biologische Energie (IBEA) in Rockville (Maryland), ihrer Arbeitsgruppe sei es gelungen, das gesamte Genom des Bakteriophagen X174 – ein Virus, das Bakterien infiziert – komplett synthetisch herzustellen, und das in nur zwei Wochen. Das synthetische Virus trägt laut Venter dieselbe DNA-Sequenz aus 5386 Basenpaaren wie die natürliche Version. Es ist auch ebenso aktiv.

»Damit rückt auch die künstliche Synthese größerer Chromosomen in greifbare Nähe«, so Venter. Mehrere Jahre lang leitete er ein Projekt über das Bakterium *Mycoplasma genitalium*. Darin wollte die Gruppe herausfinden, auf welche seiner Gene dieser besonders kleine Mikroorganismus absolut nicht verzichten kann. Venter betont: »Ob es gelingt, ein synthetisches Chromosom in eine Zelle und zum Arbeiten zu bringen, wissen wir allerdings nicht. Dazu müssten wir das Betriebssystem der Zelle so umprogrammieren, dass sie das Kunstprodukt überhaupt akzeptiert. Wir müssen Leben auf tiefstem Niveau verstehen. Davon sind wir noch weit entfernt.«

Viren nach technischer Logik

Indem man ein Virusgenom Buchstabe für Buchstabe nachbaut, lernt man über seine Funktionsweise nicht besonders viel. Aufschlussreicher könnte sein, das Genom zuerst in die funktionalen genetischen Abschnitte zu zerlegen und diese dann so zusammenzusetzen, wie es für einen Geningenieur Sinn macht. Auf diese Weise verfahren Endy und seine Kollegen mit einem anderen Bakteriophagen, bezeichnet als T7. »Wir konstruieren T7 regelrecht neu. Das heißt, wir entwerfen das Genom entsprechend den bekannten Funktionen ingenieursmäßig und synthetisieren es nach diesen Plänen.« Die Forscher schaffen sozusagen Ordnung: Zum Beispiel trennen sie Gene, die sich überlappen, und sie streichen Sequenzwiederholungen. Gut ein Drittel der über 40 000 Basenpaare hatten sie im Frühsommer 2004 bearbeitet. Den Rest wollen sie bis zum Jahresende bewältigen.

Noch können die Konstrukteure lebende genetische Systeme nur im Rahmen von Experimenten und zur Demonstration liefern. Eine Reihe von Labors entwickelt aber schon Anwendungen. Martin Fussenegger und seine Kollegen von der ETH Zürich arbeiten inzwischen mit Säugerzellen. Kürzlich etablierten sie in Hamsterzellen ein System von Genen, das jeweils auf unterschiedliche Antibiotika mit verschieden hoher Aktivität reagiert. Je nach vorhandener Substanz im Medium schaltet die Konstruktion auf maximale, moderate oder geringe Aktivität. Solche Steuersysteme könnten sich bei Gentherapien oder der Herstellung pharmakologisch aktiver Proteine als nützlich erweisen.

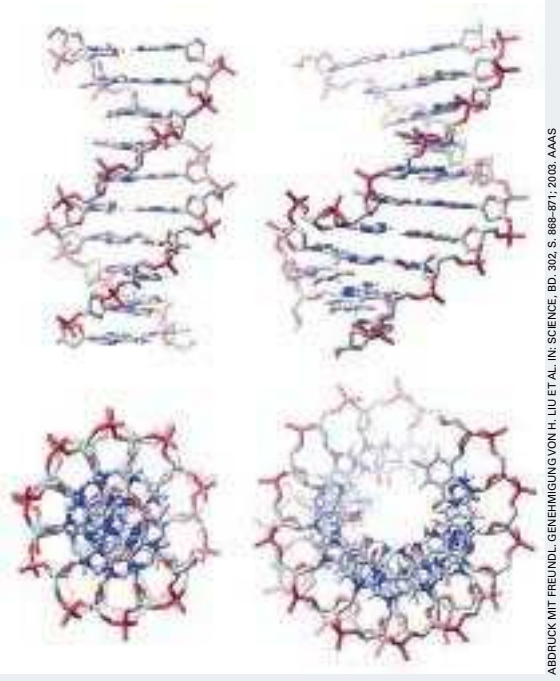
Ihren ersten Einsatz dürften artifizielle lebende Maschinen bei Aufgaben finden, die komplizierte chemische Vorgänge erfordern, wie beim Nachweis von Giftstoffen oder bei der Medikamentenherstellung. Homme W. Hellinga von der Duke-Universität in Durham (North Carolina) trimmte *E.-coli*-Bakterien auf TNT. Der Forscher konstruierte natürliche Sensorproteine der Bakterien so um, dass sie statt auf ihre üblichen Zielsubstanzen nun auf TNT – oder andere Chemikalien – ansprechen. Hellinga und Ron Weiss haben schon Kontakt aufgenommen. Sie würden gern ihre beiden Konstruktionen – die Sensorsysteme und die Leuchtanzeige – kombinieren: Sie möchten Bakterien schaffen, die den Sprengstoff aufspüren und das gleichzeitig anzeigen. Solche Organismen könnten helfen, Landminen zu orten.

Jay Keasling bastelt *E.-coli*-Bakterien, die eine Vorstufe von Artemisinin erzeugen – dem Malariamittel, dessen Gewinnung aus dem Einjährigen Beifuß zu teuer ist, um es den Kranken in armen Ländern zur Verfügung stellen zu können. Vor kurzem hat Keasling am Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) an der Universität von Kalifornien in Berkeley eine Abteilung für Synthetische Biologie aufgebaut. Seine Arbeitsgruppe hat Coli-Bakterien ein umfangreiches genetisches Netzwerk mit Genen aus der Pflanze und Hefen transferiert.

Inzwischen synthetisieren die Bakterien einen Vorläufer des Medikaments, das gegen Malaria die Medizin der Zukunft sein könnte. In dreijähriger Arbeit

Stabile Erbmoleküle

Oft sind die Konstruktionen der Geningenieure in Zellen nicht besonders stabil. Sie »mutieren« zu rasch, wenn sich die Zellen vermehren. Künstliche Erbmoleküle, die ein wenig anders aufgebaut sind als die natürliche DNA, erweisen sich als stabiler – etwa so genannte TNA und xDNA. Die von den Biologen angestrebten Aufgaben würden solche Moleküle besser erfüllen. Allerdings müssten die Zellen diese Fremdkörper auch annehmen.



ABDRUCK MIT FREUNDL. GENEHMIGUNG VON H. LIU ET AL. IN: SCIENCE, BD. 302, S. 868–871; 2003. AAAS

Links ein Modell der normalen »Strickleiter« des Erbmoleküls DNA von der Seite und in Aufsicht, recht eine künstliche »xDNA«.

Minensucher haben der Bevölkerung dieser Gegend in Afghanistan einen Weg durch von Landminen verseuchtes Gelände freigelegt.

stieg die Ausbeute um den Faktor eine Million. Gelänge nochmals eine Steigerung um das 25- bis 50fache, »dann«, so Keasling, »könnten wir Artemisinin-Produkte für die Dritte Welt zu einem Zehntel des aktuellen Preises herstellen«. Mit relativ geringfügigen Änderungen am Design des Synthesewegs ließen sich solche Bakterien überdies darauf programmieren, teure Duftstoffe oder das Krebsmedikament Taxol zu liefern.

Droht Missbrauch?

Andere Wissenschaftler am LBNL wollen *E. coli* dafür rüsten, Atommüll zu entsorgen beziehungsweise biologische oder chemische Kampfstoffe zu vernichten. So soll eine Fraktion der veränderten Mikroorganismen Nervengifte wie VX aufspüren – sie gewissermaßen riechen, dann darauf zuschwimmen und die Moleküle abbauen. Keasling ergänzt: »Wir haben Bakterien der Arten *E. coli* und *Pseudomonas aeruginosa* so umprogrammiert, dass sie in kontaminiertem Wasser Uran, Plutonium oder auch andere Schwermetalle auf ihrer Zellwand anhäufen. Mit der Fracht sinken sie dann zu Boden. Das Ergebnis ist schwermetallfreies Wasser.« Das klingt alles recht sinnvoll. Trotzdem werden Bedenken gegen die neue Forschungsrichtung laut. Manchem wird bei dem Gedanken mulmig, dass Professoren Studenten darauf ansetzen, völlig neuartige Bakterien zu erfinden, oder dass Privatlabors Viren basteln. Und was alles könnte passieren, wenn jeder in wissenschaftlichen Arbeiten nachzulesen vermag, wie man mit Hilfe von Bakterien Plutonium anreichert?

Mit dem Aufkommen der dann rasant wachsenden Gentechnik hatten führende Biologen 1975 ein Moratorium gefordert. Sie riefen ihre Kollegen ins kalifornische Asilomar zusammen und diskutierten eine Reglementierung der neuen Technologie. Offenbar hat die freiwillige Selbstbeschränkung funktioniert. Größere Schadensfälle mit gentechnisch veränderten Organismen traten bisher keine auf. Zur synthetischen Biologie gibt Endy trotzdem zu bedenken: »Wir haben in mehrfacher Hinsicht eine andere Situation. Erstens: Heute kann sich jedermann aus öffentlichen Datenbanken DNA-Sequenzen vom Milzbranderreger oder irgendwelches andere verheerende Zeugs herunterladen. Zweitens: Jede beliebige synthetische DNA ist im Prinzip erhältlich. Notfalls bezieht man sie eben aus einem Land ohne funktionierende Überwachung. Drittens gilt aber auch: Wir sind heute argwöhnischer, besonders was Missbrauch betrifft.«

Wie soll die Gesellschaft Risiken der synthetischen Biologie abwehren, ohne auf die nützlichen Aspekte zu verzichten? Endy hat eine Antwort parat: »Nehmen wir das Beispiel Internet. Das läuft, weil die Leute, die davon im guten Sinne profitieren möchten, in der Überzahl sind.« Der Biologe holt ein Foto der Studenten seines ersten MIT-Kurses. »Das sind alles fröhliche, nette Menschen. Was die entwerfen, ist interessant und nützlich. Die machen keine Viren oder Biowaffen. Den Risiken der Biotechnologie begegnet man am besten, indem man eine Gesellschaft aufbaut, die jene Möglichkeiten konstruktiv nutzt.«

Endy hält es dennoch für sinnvoll, die Problematik zum Thema einer eigenen Konferenz zu machen. Auf dem ersten offiziellen Treffen zur synthetischen Biologie am MIT in diesem Sommer haben die Forscher ihre neuesten Ideen ausgetauscht. Sie halten viele Projekte für die Zukunft bereit. Bleibt zu hoffen, dass sie sich ebenso viele Gedanken darüber machen, was sie nicht tun sollten. ◁

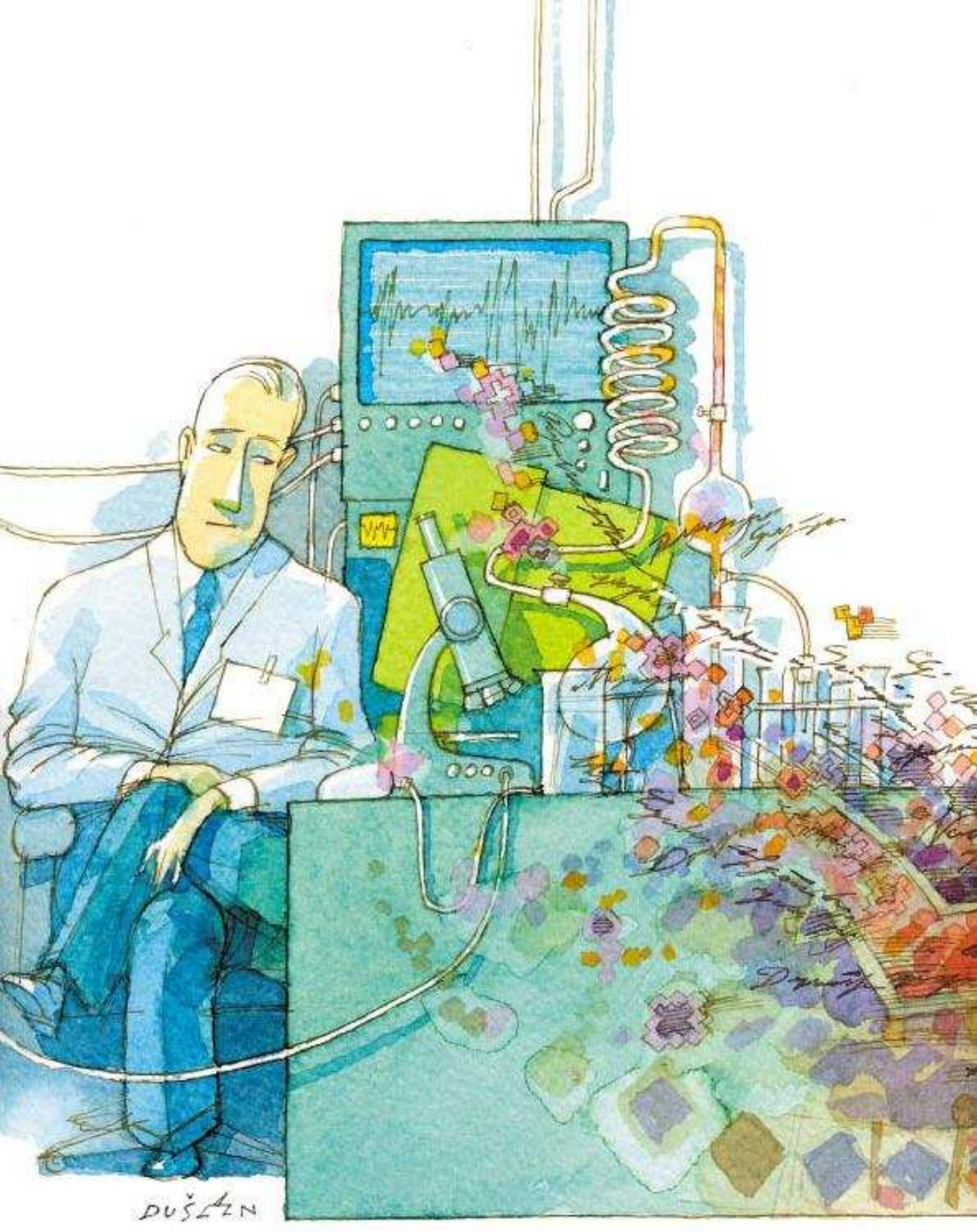
W. Wayt Gibbs ist Redakteur bei Scientific American.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

An expanded eukaryotic genetic code. Von Jason W. Chin et al., in: Science, Bd. 301, S. 964, 15. August 2003

Genetic circuit building blocks for cellular computation, communications, and signal processing. Von Ron Weiss et al., in: Natural Computing, Bd. 2, Nr. 1, S. 47, 2003

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

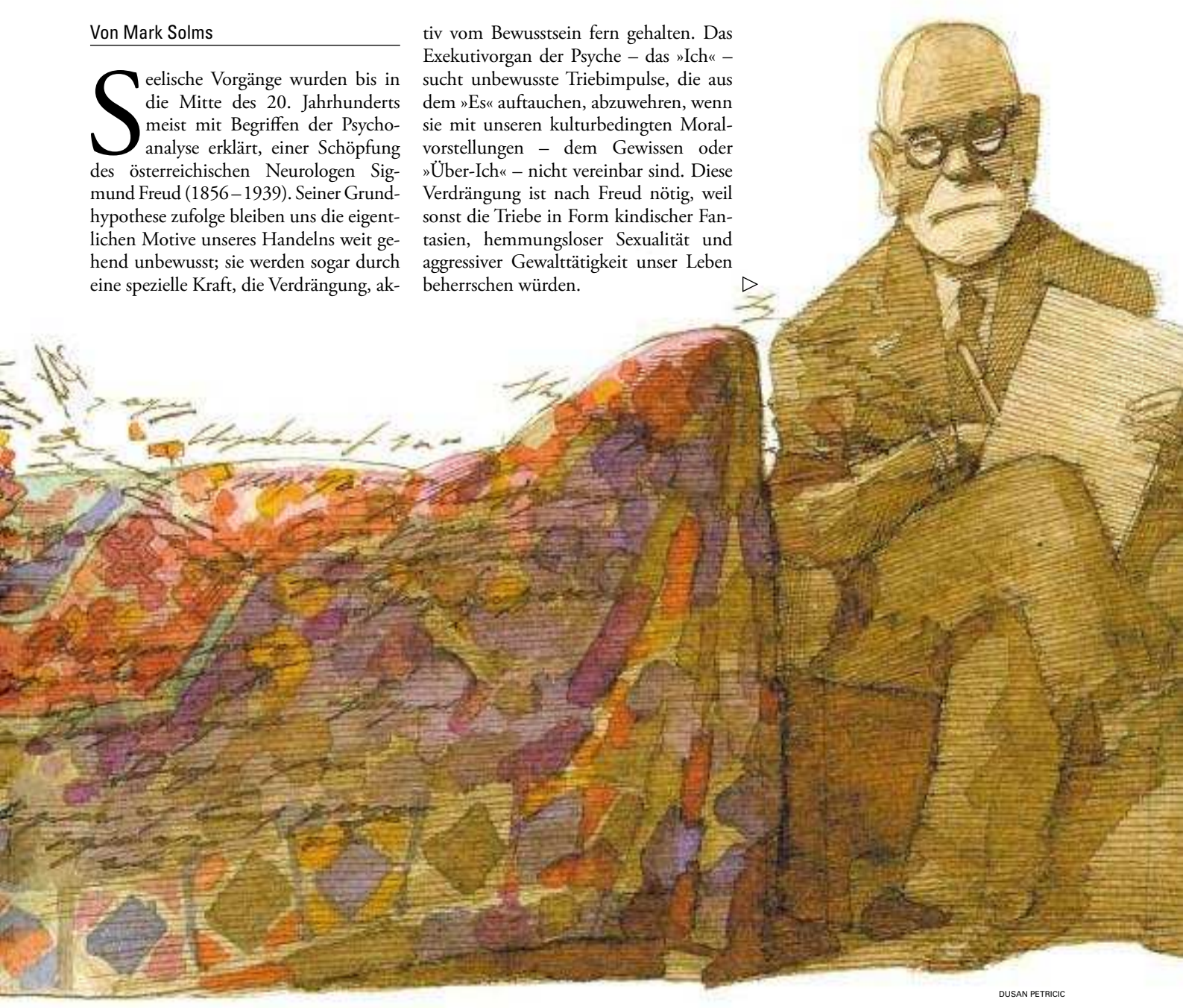

DUŠAN

Freuds Wiederkehr

Auch Neurowissenschaftler brauchen eine umfassende Theorie des Psychischen. Dabei gerät Freuds altes Modell erneut in die Diskussion.

Von Mark Solms

Seelische Vorgänge wurden bis in die Mitte des 20. Jahrhunderts meist mit Begriffen der Psychoanalyse erklärt, einer Schöpfung des österreichischen Neurologen Sigmund Freud (1856–1939). Seiner Grundhypothese zufolge bleiben uns die eigentlichen Motive unseres Handelns weit gehend unbewusst; sie werden sogar durch eine spezielle Kraft, die Verdrängung, aktiv vom Bewusstsein fern gehalten. Das Exekutivorgan der Psyche – das »Ich« – sucht unbewusste Triebimpulse, die aus dem »Es« auftauchen, abzuwehren, wenn sie mit unseren kulturbedingten Moralvorstellungen – dem Gewissen oder »Über-Ich« – nicht vereinbar sind. Diese Verdrängung ist nach Freud nötig, weil sonst die Triebe in Form kindischer Fantasien, hemmungsloser Sexualität und aggressiver Gewalttätigkeit unser Leben beherrschen würden. ▷



DUSAN PETRICIC

BETTMANN / CORBIS

Der junge Freud, zirka 1891

▷ Zu einer psychischen Erkrankung kommt es, wenn die Verdrängung versagt – daran hat Freud bis zu seinem Tod festgehalten. Der Einbruch unbewusster Triebimpulse in das bewusste und willensgesteuerte Verhalten ist die Ursache von Phobien, Panikattacken und Zwangsvorstellungen. Somit muss der Psychoanalytiker, um die Macht der neurotischen Symptome zu brechen, deren unbewusste Wurzeln aufspüren und sie dem Urteil des reifen, rationalen Ich des Patienten zugänglich machen.

Doch seit Mitte des vorigen Jahrhunderts wurde mit zunehmender Verfeinerung der Psycho- und Neurowissenschaften immer deutlicher, dass Freuds Theorie methodisch auf schwachen Beinen steht. Freud führte keine kontrollierten Experimente durch, sondern beobachtete seine Patienten im Rahmen der Therapie und zog daraus theoretische Schlüsse.

Allmählich gewannen Psychopharmaka in der Behandlung psychiatrischer Patienten an Boden, und biologische Erklärungen für psychische Krankheiten verdrängten die psychoanalytischen Ansätze. Hätte Freud das erlebt, so wäre ihm diese Wendung vermutlich sogar willkommen gewesen. Als seinerzeit hoch geachteter Neurologe machte er häufig Bemerkungen wie: »Die Mängel unserer Beschreibung würden wahrscheinlich verschwinden, wenn wir anstatt der psychologischen Termini schon die physiologischen oder chemischen einsetzen könnten.« Freilich fehlten ihm noch die wissenschaftlich-technischen Mittel, das Gehirn gesunder und neurotischer Personen im Detail zu erforschen.

Siegeszug der Neurowissenschaft

In den 1980er Jahren galten die Begriffe Es und Ich als hoffnungslos veraltet – sogar in manchen psychoanalytischen Zirkeln. Freud erschien nur noch historisch interessant. Stattdessen hieß die neueste Erkenntnis: Depressive fühlen sich keineswegs deswegen so elend, weil etwas ihre frühkindlichen Bindungen beeinträchtigt hat, sondern weil die Neurochemie ihres Gehirns aus dem Lot geraten ist. Die Psychopharmakologie vermochte allerdings ihrerseits nicht, eine umfassende Theorie der Persönlichkeit, der Emotionen und Motivationen zu bieten – eine neue Begrifflichkeit für das, was die Menschen umtreibt. Mangels eines solchen Modells beschränkten sich die Neurowissenschaftler auf Detailforschung und mieden groß angelegte Entwürfe.

In jüngster Zeit gerät jedoch das Gesamtbild wieder in den Blick – und überraschenderweise ähnelt es dem, das Freud vor mehr als hundert Jahren skizzierte. Zwar sind wir von Einmütigkeit noch weit entfernt, doch eine wachsende Anzahl verschiedenster Neurowissenschaftler kommt zum gleichen Schluss wie der Medizin-Nobelpreisträger Eric R. Kandel von der Columbia-Universität, für den die Psychoanalyse »die kohärenteste und intellektuell befriedigendste Theorie der Psyche« bleibt.

Freud ist wieder da, und zwar nicht nur in der Theorie. Inzwischen gibt es weltweit in vielen Großstädten interdisziplinäre Arbeitsgruppen, welche die Integration der vormals getrennten – oft sogar verfeindeten – Bereiche von Neurowissenschaft und Psychoanalyse anstreben. Diese Gruppen haben sich zum Teil in der Internationalen Neuro-Psychoanalytischen Gesellschaft zusammengeschlossen, die jährlich einen Kongress organisiert und die Zeitschrift »Neuro-Psychoanalysis« herausgibt. Deutlicher Beleg für die neue Wertschätzung der Freud'schen Theorie ist der wissenschaftliche Beirat dieses Journals, dem prominente Vertreter der modernen Neurowissenschaften angehören wie Antonio R. Damasio, Eric R. Kandel, Joseph E. LeDoux, Benjamin Libet, Jaak Panksepp, Vilayanur S. Ramachandran, Daniel L. Schacter und Wolf Singer.

Gemeinsam gestalten diese Forscher etwas, das Kandel »ein neues intellektuelles Bezugssystem der Psychiatrie« nennt. Anscheinend wird Freuds grobe Skizze der psychischen Organisation da-

IN KÜRZE

- Jahrzehntelang orientierten sich Psychologen und Psychiater bei der Behandlung seelischer Erkrankungen überwiegend an Freud'schen Begriffen wie **»Ich«, »Es« und »Verdrängung«**. Mit zunehmendem Wissen um die Biochemie des Gehirns wurde dieses Modell allmählich durch neurobiologische Erklärungen für psychische Prozesse ersetzt.
- Neueste Versuche, verschiedene neurologische Ergebnisse zu integrieren, führen zu einem **neurochemischen Modell der Psyche**, das Freuds fast hundert Jahre alten Entwurf in wichtigen Punkten bestätigt. Eine wachsende Gruppe von Forschern ist bestrebt, Neurologie und Psychiatrie in einer umfassenden Theorie zu versöhnen.

bei eine ähnliche Rolle spielen wie Darwins Evolutionstheorie für die molekulare Genetik – als ein Rahmen, in den neue Detailresultate zwanglos hineinpassen. Zugleich finden Neurowissenschaftler empirische Belege für manche Hypothese Freuds und spüren die neuronalen Mechanismen auf, die den von ihm beschriebenen psychischen Vorgängen zu Grunde liegen.

Freuds zentrale Hypothese, wonach die psychischen Prozesse, die unser Denken, Fühlen und Wollen motivieren, überwiegend unbewusst ablaufen, stieß bei den meisten seiner Zeitgenossen auf Ablehnung. Heute jedoch ist durch zahlreiche Forschungsergebnisse bestätigt, dass es unbewusste Vorgänge gibt und dass sie im psychischen Geschehen eine Schlüsselrolle spielen. So vermögen Kranke, bei denen bestimmte gedächtnisrelevante Strukturen des Gehirns beschädigt wurden – etwa durch einen Schlaganfall –, zwar das nachher Erlebte nicht mehr bewusst zu erinnern, aber ihr Verhalten wird dennoch eindeutig von den »vergessenen« Inhalten beeinflusst. In den kognitiven Neurowissenschaften erklärt man solche Fälle mit der Annahme unterschiedlicher Gedächtnissysteme, in denen Informationen entweder »explizit« (bewusst) oder »implizit« (unbewusst) verarbeitet werden. Diese Aufteilung des Gedächtnisses findet sich schon bei Freud.

Der Ort des Unbewussten

Die Neurowissenschaftler haben auch unbewusste Gedächtnissysteme eingrenzen können, die emotionales Lernen bedingen. Wie Joseph E. LeDoux 1996 an der New York University nachwies, existiert unterhalb der für bewusste Prozesse zuständigen Hirnrinde eine Nervenbahn, welche Wahrnehmungsdaten direkt an primitive, für Furchtreaktionen verantwortliche Hirnstrukturen übermittelt. Da diese Nervenbahn den Hippocampus – der bewusste Erinnerungen erzeugt – umgeht, lösen aktuelle Erlebnisse oft unbewusste Erinnerungen an emotionsgeladene Ereignisse aus; dies verursacht im Bewusstsein scheinbar irrationale Gefühle – zum Beispiel »Männer mit Bart sind mir nicht geheuer«.

Die Neurowissenschaft hat gezeigt, dass die für die Bildung bewusster (expliziter) Erinnerungen nötigen Hirnstrukturen während der ersten beiden Lebensjahre noch nicht funktionsfähig sind – eine elegante Erklärung für das von Freud als Kindheitsamnesie bezeichnete Phänomen. Nach Freud werden die frühesten Erinnerungen nicht vergessen, sie sind nur nicht mehr bewusst erinnerbar. Das schließt aber nicht aus, dass sie sich auf Gefühle und Verhalten des Erwachsenen auswirken. Heutzutage würde wohl kaum ein Entwicklungsneurobiologe bestreiten, dass frühe Erfahrungen – insbesondere Kindheitserlebnisse mit der Mutter – das Muster der neuronalen Verschaltungen im Gehirn beeinflussen und auf diese Weise unsere künftige Persönlichkeit und ihre seelische Gesundheit grundlegend prägen. Doch keines dieser Erlebnisse kann bewusst erinnert werden – ein weiteres Beispiel dafür, dass unsere psychischen Vorgänge zu einem großen Teil unbewusst motiviert sind.

Freud'sche Verdrängung – neurobiologisch betrachtet

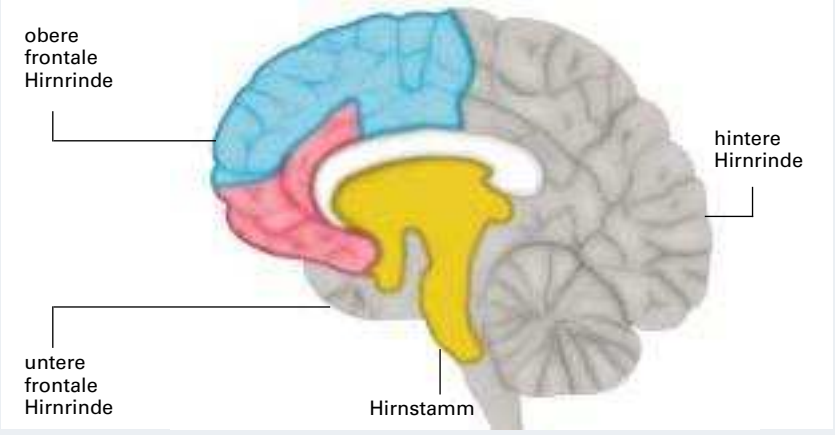
Selbst wenn wir großenteils von unbewussten Motiven angetrieben werden, beweist dies freilich noch längst nicht Freuds Behauptung, wir würden unangenehme Bewusstseinsinhalte aktiv verdrängen. Doch auch dafür mehren sich ▷

Geist und Materie

Freuds letzte Skizze des »psychischen Apparats« stammt aus dem Jahre 1933 (rechts, nachträglich koloriert). Die punktierten Linien bezeichnen die Schwelle zwischen unbewusster und bewusster Verarbeitung. Das Über-Ich verdrängt unbewusste Triebimpulse (des Es) und verhindert deren Einbruch in den Bereich rationalen Denkens. Auch die rationalen Denkprozesse (des Ich) verlaufen großenteils automatisch und unbewusst. Für das bewusste Erleben bleibt nur ein kleiner, eng an Wahrnehmungsprozesse gebundener Teil des Ich übrig (die mit W-Bw, Wahrnehmung/Bewusstsein, bezeichnete Ausstülpung). Das Über-Ich vermittelt im Dauerkonflikt zwischen Ich und Es.

Moderne neurologische Kartierungen (unten) stimmen grob mit Freuds Schema überein. Stammhirn und limbisches System – zuständig für Triebe und Instinkte – entsprechen ungefähr Freuds Es. Die untere frontale Hirnrinde steuert selektive Hemmungsvorgänge, die obere frontale Hirnrinde regelt selbstbewusstes Denken, die hintere Hirnrinde repräsentiert und verarbeitet Sinneseindrücke aus der Außenwelt. Diese drei Regionen entsprechen Ich und Über-Ich.

A.W. FREUD ET AL.; ARRANGEMENT: PATERSON MARSH LTD., LONDON; FARBGEBUNG: OLIVER TURNBULL



OLIVER TURNBULL

▷ inzwischen Belege aus der klinischen Forschung. Berühmt wurde die Fallstudie über Patienten mit Anosognosie, die der Verhaltensneurologe Ramachandran von der Universität von Kalifornien in San Diego 1994 veröffentlichte. Diese Kranken sind auf Grund einer Hirnschädigung im Bereich der rechten Scheitelregion nicht im Stande, selbst massive körperliche Funktionsausfälle – etwa die Lähmung eines Körperglieds – zu erkennen. Erst als Ramachandran die rechte Hirnhemisphäre einer solchen Patientin künstlich stimulierte, wurde ihr plötzlich bewusst, dass ihr linker Arm gelähmt war – und zwar schon seit ihrem Schlaganfall vor acht Tagen. Dies zeigte, dass die Patientin die Lähmung unbewusst schon von Anbeginn registriert hatte, während sie bewusst hartnäckig bestritt, irgendwelche Probleme zu haben.

Bezeichnenderweise kehrte die Frau, sobald die Wirkung der Hirnstimulierung abgeklungen war, nicht nur zu der früheren Überzeugung zurück, ihr Arm sei gesund, sondern sie vergaß auch, dass sie im Gespräch mit dem Forscher die Lähmung zugegeben hatte – obwohl sie ansonsten jedes Detail des Gesprächs erinnerte. Ramachandran schließt seinen Bericht mit den Worten: »Diese Beobachtungen lassen die bemerkenswerte theoretische Schlussfolgerung zu, dass Erinnerungen tatsächlich selektiv verdrängt werden können. [...] Die Untersuchung [dieser Patientin] überzeugte mich zum ersten Mal von der Realität der Verdrängungsphänomene, die den Grundstein der klassischen psychoanalytischen Theorie bilden.«

Wunschdenken und Lustprinzip

Ähnlich wie die Split-Brain-Patienten, bei denen die Verbindung zwischen den Hirnhemisphären durchtrennt wurde – und über die der verstorbene Nobelpreisträger Roger W. Sperry am California Institute of Technology in den 1960er und 1970er Jahren klassische Forschungen anstellte –, neigen auch Patienten mit Anosognosie dazu, unangenehme Tatsachen »wegzurationalisieren«: Sie geben für ihre unbewusst motivierten Handlungen plausible, aber unzutreffende Erklärungen. Auf diese Weise, so Ramachandran, setzt die linke Hemisphäre offenkundig die Freud'schen »Abwehrmechanismen« ein.

Entsprechende Phänomene sind inzwischen auch bei Personen mit intaktem Gehirn nachgewiesen worden. Der Neuropsychologe Martin A. Conway von der Durham-Universität in England meinte dazu in einem 2001 in der Zeitschrift »Nature« erschienenen Kommentar: Wenn sich schon bei Durchschnittsmenschen in einer harmlosen Laborsituation signifikante Verdrängungseffekte erzeugen lassen, dann sind in tatsächlich traumatischen Lebenssituationen noch viel stärkere Effekte zu erwarten.

Freud ging sogar noch einen Schritt weiter: Nicht nur, dass ein großer Teil unseres Seelenlebens unbewusst bleibt und aktiv verdrängt wird – der verdrängte Teil der unbewussten Psyche funktioniert auch nach einem ganz anderen Prinzip als das vom »Realitätsprinzip« beherrschte bewusste Ich. Diese unbewussten Vorgänge sind krasses »Wunschdenken«, das die Regeln der Logik und des Zeitablaufs völlig auf den Kopf stellt.

Konfabulationen

Wenn Freud Recht hat, dann sollte eine Schädigung der hemmenden Strukturen des Gehirns – im neuronalen Korrelat des »verdrängenden« Ego – irrationale Wunschvorstellungen hervorrufen. Genau dies wurde bei Patienten mit einer Läsion im frontal-limbischen Bereich, der für wesentliche Aspekte unserer Selbstbewusstheit und Selbstkontrolle zuständig ist, tatsächlich beobachtet. Diese Kranken zeigen ein sehr auffallendes Syndrom, die so genannte Korsakow-Psychose: Ihre hochgradige Gedächtnisstörung (Amnesie) ist ihnen nicht bewusst, und sie füllen die Gedächtnislücken mit erfundenen Geschichten, so genannten Konfabulationen.

Die Neuropsychologin Aikaterini Fotopoulou von der Durham-Universität hat kürzlich einen solchen Patienten in meinem Labor untersucht. In je fünfzig Minuten langen Gesprächen an zwölf aufeinander folgenden Tagen vermochte dieser Mann sich nicht zu erinnern, dass er mich je gesehen hatte und dass ihm ein Tumor im Vorderhirn – die Ursache seiner Amnesie – operativ entfernt worden war. Er fand, mit ihm sei alles in Ordnung. Auf die große Narbe an seinem Kopf angesprochen, konfabulierte er: Die Narbe stamme von einer Zahn- oder von einer Bypass-Operation am Herzen. Tatsächlich wurden Jahre zuvor diese Eingriffe an ihm durchgeführt, und im Unterschied zu seiner Hirnoperation waren sie erfolgreich verlaufen.

Wenn ich ihn fragte, wer ich sei und wozu er sich in meinem Labor aufhalte, antwortete er einmal, ich sei ein Kollege, dann wiederum ein Zechkumpan, oder ein Kunde, der seinen professionellen Rat einholen wolle, ein Mannschaftskamerad aus dem Sport, den er seit seiner Jahrzehnte zurückliegenden College-Zeit nie mehr betrieben hatte, oder ein Automechaniker, der einen seiner zahlreichen Sportwagen – die er gar nicht besaß – reparieren sollte. Auch sein Verhalten passte zu diesen falschen Überzeugungen: Er sah sich im Zimmer nach seinem Bier um oder schaute aus dem Fenster nach seinem Sportwagen.

Für Laien besonders frappant ist die kritiklose, wunschbestimmte Qualität sol-

Für Freud ein Traum

Erst moderne bildgebende Verfahren zeigen, welche Hirnschädigung einer Störung der psychischen Funktionen zu Grunde liegt; Freud war seinerzeit nur auf klinische Beobachtung angewiesen. Die kernspintomografische Aufnahme eines Patienten mit größenfantastischen Konfabulationen zeigt eine Läsion (Pfeil) im vorderen Bereich der cingulären Windung, einem Teil des mittleren Stirnlappens. Dieser Bereich ist für Steuerungsfunktionen zuständig, die Freud zufolge unser rationales Ich normalerweise vor dem Ausbruch unbewusster Wunschtendenzen bewahren.

Schichtbild des Gehirns mittels Kernspintomografie

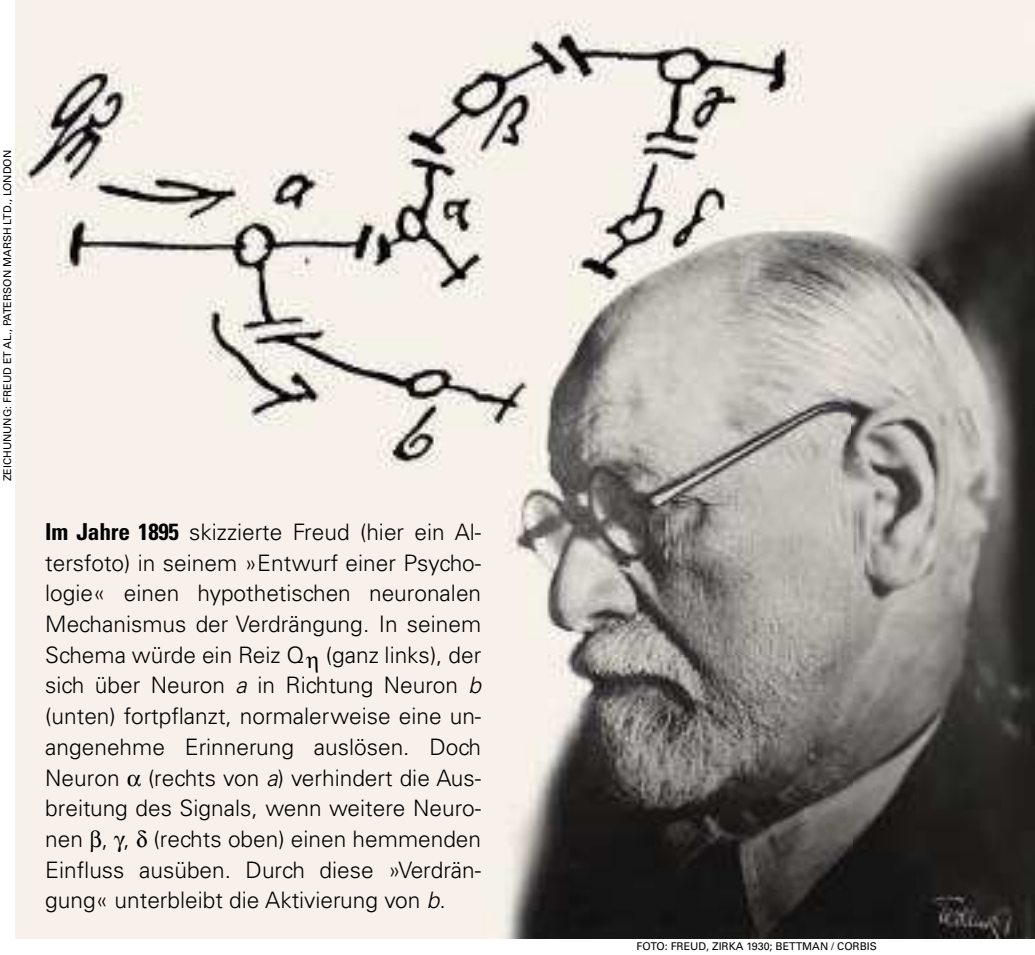
MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG DURCH OLIVER TURNBULL

cher Einbildungen; diesen Eindruck bestätigte Fotopoulou objektiv durch quantitative Analyse einer Serie von 155 aufeinander folgenden Konfabulationen des Patienten. Seine falschen Überzeugungen waren keineswegs zufällige Fantastereien – sie wurden vom »Lustprinzip« erzeugt, das nach Freuds Überzeugung unbewusste Denkvorgänge kennzeichnet. Der Patient legte sich einfach die Realität so zurecht, wie er sie sich wünschte. Ähnliche Beobachtungen haben auch Martin Conway von der Durham-Universität und Oliver Turnbull von der Universität von Wales berichtet. Diese Forscher sind keine Psychoanalytiker, sondern kognitive Neurowissenschaftler, aber sie interpretieren ihre Befunde mit Freud'schen Begriffen. Im Wesentlichen meinen sie, dass eine Läsion im frontal-limbischen Bereich Konfabulationen hervorruft, weil sie kognitive Steuerungsmechanismen beschädigt, die normalerweise eine realitätsgerechte Einstellung gewährleisten. Dadurch werden implizite Wunschvorstellungen enthemmt, die nun Wahrnehmung, Gedächtnis und Urteilsvermögen prägen.

Freud zufolge steht das Lustprinzip für primitive, animalische Triebtendenzen im Menschen. Seine viktorianischen Zeitgenossen fanden die Ansicht, menschliches Verhalten sei im Grunde durch sinnlich-triebhaftes Verlangen bestimmt, geradezu skandalös. Zwar ebbte die moralische Entrüstung in den folgenden Jahrzehnten ab, aber Freuds Betonung der animalischen Komponente fand bei den Kognitionswissenschaftlern lange Zeit kaum Beachtung.

Das hat sich geändert. Namhafte Neurowissenschaftler wie Donald W. Pfaff von der Rockefeller-Universität und Jaak Panksepp von der Bowling Green State University meinen, dass die Instinktmechanismen, die menschlichen Motiven zu Grunde liegen, sogar noch primitiver sind als von Freud angenommen. Wir haben tief liegende emotionaltriebhafte Motivationssysteme nicht nur mit unseren Verwandten in der Primatenreihe gemeinsam, sondern mit allen Säugetieren. In den tiefen Schichten unserer psychischen Organisation, die Freud als das Es bezeichnete, unterscheidet sich die funktionelle Anatomie und Neurochemie unseres Gehirns kaum von der unserer Nutz- und Haustiere.

Freuds einfache Aufteilung des menschlichen Trieblebens in Sexualität und Aggression wird von den modernen Neurowissenschaften allerdings nicht mehr akzeptiert. Durch gezielte Untersuchung von Hirnschädigungen, Einwirkung von Medikamenten und künstliche Stimulierung bestimmter Hirnzentren hat man bei verschiedenen Säugetieren inzwischen mindestens vier grundlegende Triebsysteme abgrenzen können, die sich zum Teil überschneiden: das Appetenz- oder Belohnungssystem (das die Suche nach Lusterlebnissen motiviert); das Zorn-Wut-System (welches wütende Aggression auslöst, aber nicht die Aggression von Raubtieren beim Beutefang); das Furcht-Angst-System; und schließlich das Panik-System (das komplexe Triebe umfasst wie jene, die soziales Bindungsverhalten regulieren).



ZEICHNUNG: FREUD ET AL., PATERSON MARSH LTD., LONDON

Im Jahre 1895 skizzierte Freud (hier ein Altersfoto) in seinem »Entwurf einer Psychologie« einen hypothetischen neuronalen Mechanismus der Verdrängung. In seinem Schema würde ein Reiz Q_η (ganz links), der sich über Neuron *a* in Richtung Neuron *b* (unten) fortpflanzt, normalerweise eine unangenehme Erinnerung auslösen. Doch Neuron α (rechts von *a*) verhindert die Ausbreitung des Signals, wenn weitere Neuronen β, γ, δ (rechts oben) einen hemmenden Einfluss ausüben. Durch diese »Verdrängung« unterbleibt die Aktivierung von *b*.

FOTO: FREUD, ZIRKA 1930; BETTMAN / CORBIS

Das Tier in uns

Ob es noch weitere Triebe gibt, beispielsweise ein eigenes System für das Rauf- und Spielverhalten von Jungtieren, wird derzeit untersucht. All diese verhaltenssteuernden Systeme des Gehirns werden durch spezifische Neurotransmitter moduliert – durch Botenstoffe, die bei der Signalübermittlung zwischen Nervenzellen eine wichtige Rolle spielen.

Das Appetenzsystem wird durch den Neurotransmitter Dopamin reguliert und ähnelt auffallend der Freud'schen »Libido«. Aus der Sicht Freuds ist der libidinöse oder Sexualtrieb ein Lust suchendes System, das den größten Teil unserer zielgerichteten Interaktionen mit der Umwelt antreibt. Die moderne Forschung hat die zentrale Rolle der entsprechenden neuronalen Strukturen bei fast allen Formen von Sucht und krankhafter Abhängigkeit belegt. Interessanterweise war Freud durch seine frühen Selbstversuche mit Kokain zur Überzeugung gelangt, dass die Libido eine spezifisch neurochemische Grundlage haben müsse. Im Unterschied zu seinen Nachfolgern sah er keinen unüberbrückbaren Gegensatz zwischen Psychoanalyse und Psychopharmakologie. Er setzte etwa 1940 große Hoffnungen in »noch ungeahnte andere Möglichkeiten der Therapie«, wenn es eines Tages gelingen werde, »mit besonderen chemischen Stoffen die Energiemengen und deren Verteilung im seelischen Apparat direkt zu beeinflussen«. Heutzutage gelten Behandlungsformen, in denen die Psychotherapie mit dem Verabreichen von Psychopharmaka kombiniert wird, für viele seelische Erkrankungen als optimal. Mit modernen bildgebenden Verfahren lässt sich nachweisen, dass Psychotherapie das Gehirn in ähnlicher Weise beeinflusst wie diese Medikamente.

Auch in der Schlaf- und Traumforschung erwachen Freuds Ideen zu neuem ▷

Gegenrede

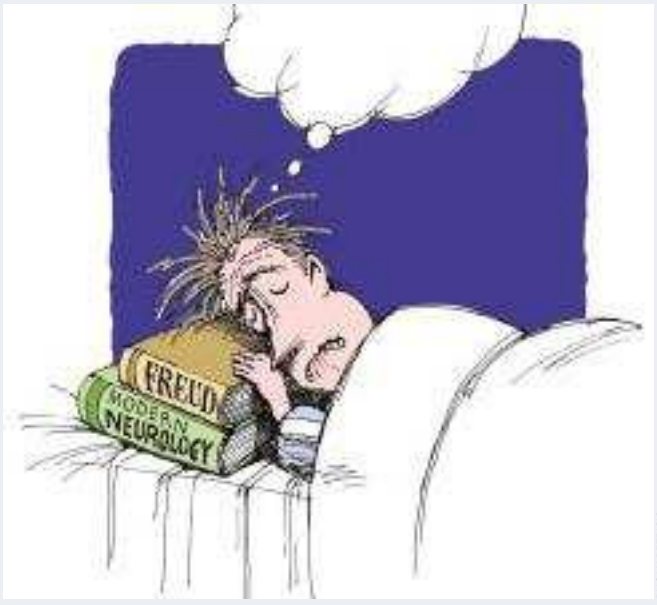
Freuds Wiederkehr? – ein Albtraum!

Von J. Allan Hobson

Sigmund Freuds Ansichten zur Bedeutung von Träumen bildeten das Kernstück seiner Theorie des Psychischen. Mark Solms und andere behaupten, Freuds Konzeption der Psyche werde nun durch bildgebende Verfahren und Läsionsstudien bestätigt. Doch wissenschaftliche Untersuchungen mit denselben Methoden zeigen, dass wesentliche Aspekte von Freuds Gedanken wahrscheinlich falsch sind.

Für Freud entsteht das bizarre Wesen der Träume aus dem sorgfältigen Bemühen der Psyche, durch symbolische Verschiebung und Zensur die inakzeptablen Triebwünsche zu verbergen, die aus dem Unbewussten aufsteigen, wenn das Ich im Schlaf seine Abwehrmechanismen gegenüber dem Es lockert. Doch die neurobiologische Faktenlage stützt überwiegend eine andere Ansicht: Die bizarre Form der Träume resultiert aus normalen Zustandsänderungen des Gehirns. Deren Ursache sind chemische Prozesse im Hirnstamm, die das Aktivierungsniveau verschiedener Hirnrindenbereiche verändern. Zahlreiche Studien haben gezeigt, dass die neurochemischen Veränderungen die Qualität und Quantität von Bildern, Emotionen und Gedanken des Träumenden bestimmen. Freuds Verschiebungs- und Zensur-Theorie muss aufgegeben werden; niemand glaubt, dass der Kampf zwischen Ich und Es – sofern es ihn überhaupt gibt – die Hirnchemie steuert. Sogar die meisten Psychoanalytiker behaupten nicht mehr, die Verschiebungs- und Zensur-Theorie sei gültig.

Was bleibt dann von Freuds Traumtheorie noch übrig? Nicht viel – allenfalls, dass Triebimpulse zur Traumbildung beitragen können. Dies lässt sich tatsächlich belegen: Die Stimulierung derjenigen Teile des limbischen Systems, die Angst, Wut oder Hochstimmung erzeugen, drückt sich in entsprechenden Träumen aus. Aber solche Einflüsse sind keine »Wünsche«. Wie Traumanalysen zeigen, sind die Emotionen in Träumen ebenso oft negativ wie positiv – demnach wäre die Hälfte dessen, was wir uns für uns selbst »wünschen«, unangenehm. Zudem sind die Emotionen, wie jeder Träumer weiß, nur selten verhüllt oder symbolisch verschoben; sie treten in den Traumszenen deutlich hervor und haben – etwa bei Albträumen – oft äußerst unerwünschte Wirkung. Freud vermochte nie zu erklären, warum so viele Traumemotionen negativ sind.



DUSAN PETRICIC

Ein weiterer Pfeiler des Freud'schen Modells ist die Behauptung: Weil die wahre Bedeutung von Träumen verborgen sei, könne ihr emotionaler Gehalt nur durch die abenteuerliche Methode der freien Assoziation enthüllt werden. Dabei soll der Analysand alles und jedes ausplaudern, was ihm zum Traum einfällt – in der Hoffnung, dass er dabei über einen wichtigen Zusammenhang stolpert. Diese Mühe ist aber gar nicht nötig, denn der Traum verbirgt überhaupt nichts. Der emotionale Gehalt des Traums springt geradezu ins Gesicht; Träumer und Therapeut müssen nur genau hinschauen, um die geträumten Gefühle zu sehen.

Solms und andere Freudianer unterstellen: Wer Träume auf neurochemische Prozesse zurückführt, der behauptet damit zugleich, Träume enthielten keine emotionalen Botschaften. Doch die beiden Aussagen sind keineswegs gleichbedeutend. Die von Robert W. McCarley an der Harvard Medical School und mir 1977 entwickelte Theorie der neurochemischen Aktivierung und Synthese des Träumens besagt nur: Die psychoanalytische Behauptung, dass Träume deswegen so bizarr anmuten, weil sie ihre Bedeutung verbergen, ist falsch. Wir haben nie abgestritten, dass Träume emotional aufschlussreich und bedeutungsvoll sind. Und was den REM-Schlaf anbelangt, so belegen neue Studien zwar, dass Träume auch in Nicht-REM-Schlafphasen auftreten können – aber unser neurochemisches Aktivierungsmodell schließt das überhaupt nicht aus; nur ist die Traumhäufigkeit im REM-Schlaf um ein Vielfaches höher.

Die Psychoanalyse ist in großen Schwierigkeiten, daran vermag auch noch so viel neurobiologische Flickschusterei nichts zu ändern. Erforderlich wäre eine derart radikale Generalüberholung, dass viele Neurowissenschaftler lieber ein von Grund auf neues neurokognitives Modell der Psyche entwickeln möchten. Die Psychoanalyse versteht sich in der Tat als umfassende Theorie, aber wenn sie voll schrecklicher Fehler steckt, ist dieser Anspruch kaum ein Vorzug. Die Wissenschaftler, die diese Skepsis teilen, favorisieren biologisch fundierte Modelle für Träume, seelische Erkrankung und normales bewusstes Erleben gegenüber dem, was die Psychoanalyse zu bieten hat.

J. Allan Hobson ist Professor für Psychiatrie an der Harvard Medical School. Er hat zahlreiche Arbeiten über das Gehirn als neuronale Grundlage des Psychischen und die Konsequenzen für die Psychiatrie veröffentlicht. Mehr darüber findet der interessierte Leser in Hobsons Buch »Dreaming: An introduction to the science of sleep« (Oxford University Press, 2003).

▷ Leben. Seine Deutung des Traums – er sei eine symbolisch »verschobene« Erfüllung unbewusster Wünsche – geriet in Misskredit, als in den 1950er Jahren die REM-Schlafphasen mit rascher Augenbewegung *(rapid eye movement)* und eng damit korrelierter Traumaktivität entdeckt wurden. Freuds Traumtheorie schien schließlich vollends überholt zu sein, als Forscher in den 1970er Jahren zeigen konnten, dass der Traumzyklus auf neuronaler Ebene über Acetylcholin reguliert wird; dieser im Gehirn weit verbreitete Neurotransmitter wird in Kerngebieten des Hirnstamms produziert, die kaum mit dem psychischen Geschehen zusammenhängen. REM-Schlafphasen treten etwa alle 90 Minuten auf; sie werden durch Neurotransmitter und neurale Strukturen ausgelöst und gesteuert, die mit den Zentren für Emotion und Motivation nichts zu tun haben. Daraus wurde der Schluss gezogen, Träume hätten keinen tieferen Sinn, sondern seien lediglich in den höheren Hirnregionen fabrizierte Geschichten, in denen sich die durch den REM-Schlaf hervorgerufene Zufallsaktivität der Hirnrinde widerspiegle.

Neuere Forschungen haben indessen gezeigt, dass Träumen und REM-Schlaf nicht dasselbe sind, sondern durch separate – obgleich miteinander in Wechselwirkung stehende – Mechanismen zu Stande kommen. Träume entstehen in einem neuralen Netzwerk, dessen Zentrum die Schaltkreise des Trieb- und Motivationssystems im Vorderhirn bilden.

Diese Entdeckung hat eine ganze Reihe neuer Theorien über das träumende Gehirn angeregt, die oft stark an Freuds Traumdeutung erinnern. Besonders interessant ist die von anderen Forschern und mir gemachte Beobachtung, dass das Träumen vollständig aufhört – und motiviertes Verhalten generell reduziert erscheint –, wenn bestimmte Nervenbahnen tief im Innern des Frontallappens durch einen Krankheitsprozess beschädigt sind. Diese Läsion entspricht genau der künstlich gesetzten Schädigung bei der so genannten präfrontalen Leukotomie, einem längst überholten neurochirurgischen Verfahren, mit dem man früher Halluzinationen und Wahnideen ausschalten wollte.

Seit den 1960er Jahren ist das Verfahren durch Psychopharmaka ersetzt worden, mit denen man die übermäßige Dopaminaktivität in denselben Strukturen des Gehirns gezielt herunterregulieren kann. Ist somit das Appetenzsystem der primäre Traumgenerator? Diese Möglichkeit bildet einen Schwerpunkt gegenwärtiger Forschung.

Sollte sich die Hypothese bestätigen, so gewänne Freuds Grundsatz »Der Traum ist eine Wunscherfüllung« erneut an Aktualität. Doch selbst wenn sich andere Deutungen der neurologischen Befunde durchsetzen, steht zumindest eines fest: Psychologische Beschreibungen des Traumgeschehens gelten wieder als wissenschaftlich respektabel. Nur wenige Neurowissenschaftler behaupten noch heute – wie früher die meisten –, der Trauminhalt hätte mit den Emotionen und Motiven des Träumers nichts zu tun.

Die große Aufgabe: Integration von Psychiatrie und Neurologie

Die Renaissance Freud'scher Begriffe in den Neuro- und Psychowissenschaften löst nicht überall Begeisterung aus. Viele Psychoanalytiker der älteren Generation akzeptieren nur schwer, dass ihre jüngeren Kollegen und Studenten die herkömmliche Lehre nun im Licht neurobiologischer Befunde kritisch überprüfen. Doch viele der Älteren zu beiden Seiten des Atlantiks zeigen sich zumindest aufgeschlossen; das belegen die namhaften Psychoanalytiker im Beirat der Zeitschrift »Neuro-Psychoanalysis« und die zahlreichen ergrauten Mitglieder der Internationalen Neuro-Psychoanalytischen Gesellschaft.

Ältere Neurowissenschaftler wiederum sträuben sich gegen die Rückkehr psychoanalytischer Ideen, weil ihnen aus den Anfängen ihres Berufs das scheinbar unzerstörbare Gebäude der Freud'schen Theorie in unangenehmer Erinnerung geblieben ist. Sie vermögen nicht einmal eine partielle Bestätigung Freud'scher Erkenntnisse anzuerkennen, sondern fordern die komplette Säuberung. Für J. Allan Hobson, einen renommierten Schlafforscher und Psychiater der Harvard Medical School, steckt hinter dem erneuten Interesse an Freud nicht viel mehr als die nutzlose nachträgliche Anpassung moderner Daten an einen veralteten theoretischen Rahmen (siehe den Kasten auf der gegenüberliegenden Seite).

Doch wie Panksepp 2002 in einem Interview für das Wochenmagazin »Newsweek« sagte: Für Neurowissenschaftler, welche die Wiederversöhnung von Psychiatrie und Neurologie begrüßen, »geht es gar nicht darum, ob Freud Recht hatte oder nicht, sondern um das Vollenden der Aufgabe«.

Wenn es uns gelingt, diese Aufgabe zu Ende zu führen und Kandels »neues theoretisches Bezugssystem der Psychiatrie« zu etablieren, stehen Menschen mit psychischen Problemen nicht länger vor der Wahl zwischen einer psychoanalytischen Therapie, die den Anschluss an die moderne Erfahrungsmedizin verloren hat, und einer Behandlung mit Psychopharmaka, die blind ist für den Zusammenhang zwischen der Neurochemie des Gehirns und einer komplexen, emotional belastenden Lebensgeschichte.

Was auch immer die Zukunft noch an ungeahnten Therapien bringen mag – die Patienten können von besserem Wissen um die Hirnvorgänge nur profitieren. Die modernen Neurowissenschaftler behandeln erneut die tiefen Probleme der menschlichen Psyche, die Freud ein Leben lang beschäftigten – und da ist es erfreulich, dass wir auf seinem Fundament aufbauen können und nicht ganz von vorn beginnen müssen. Gewiss gibt es in Freuds kühnen Hypothesen schwache Punkte. Indem wir sie herausfinden und dadurch sein Werk korrigieren, revidieren und ergänzen, fällt uns das Privileg zu, die große Aufgabe zu vollenden. ◁

Mark Solms ist Professor für Neuropsychologie an der Universität von Kapstadt (Südafrika) sowie unter anderem Direktor des Arnold Pfeffer Center for Neuro-Psychoanalysis am New York Psychoanalytic Institute. Solms ist Herausgeber und Übersetzer der auf vier Bände geplanten Reihe »The Complete Neuroscientific Works of Sigmund Freud«, die bei Karnac Books (London) erscheinen wird.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Das Gehirn und die innere Welt. Von Mark Solms und Oliver Turnbull. Walter, Düsseldorf 2004

Neuro-Psychoanalyse. Von K. Kaplan-Solms und M. Solms. Klett-Cotta, Stuttgart 2003

Auf dem Weg zu einer Anatomie des Unbewussten. Von Mark Solms, in: Erinnerung von Wirklichkeiten – Psychoanalyse und Neurowissenschaften im Dialog. Bd. 1. Von M. Koukkou, M. Leuzinger-Bohleber, W. Mertens (Hg.). Klett-Cotta, Stuttgart 1998

The neuropsychology of dreams. Von Mark Solms. Lawrence Erlbaum Associates, 1997

Was sind Affekte? Von Mark Solms, in: Psyche – Zeitschrift für Psychoanalyse und ihre Anwendungen, Bd. 50, S. 485 (1996)

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

TESA SCRIBOS GMBH

Sicherheit auf den Punkt gebracht

Computergenerierte Hologramme auf Klebebändern dienen als Echtheitsmerkmal für Produkte.

Von Thorsten Krome

Erinnern Sie sich noch? Im Jahr 1998 machten Physiker der Universität Mannheim von sich reden, als sie eine handelsübliche Tesafilmrolle zweckentfremdeten und auf ihr mit einem Laser digitale Daten einbrannten. Eine ganze Rolle versprach theoretisch gut zehn Gigabyte aufzunehmen. Die tesa-ROM – das Speichermedium der Zukunft? Im Labor hatte das transparente Klebeband des Hamburger Herstellers seine unverhofften Stärken jedenfalls bewiesen. Kein Wunder also, dass man auch im Hause tesa eine lukrative Geschäftsidee witterte und gerne bereit war, die Ideen von Steffen Noehte und seinen Kollegen zu unterstützen und so den Wissenschaftlern den Weg zur Weiterentwicklung zukünftiger Anwendungen ebnete.

Mittlerweile sind einige Jahre ins Land gezogen und aus der Kooperation ist das Heidelberger Unternehmen tesa scribos hervorgegangen. Dort feilen Noehte und Co. an Produkten, die Klebetechnik sinnvoll mit optischer Datenspeicherung verbinden. Dabei geht es nicht unbedingt darum, riesige Datenmengen auf Rolle zu bannen, manchmal reicht schon ein kleiner Punkt für eine findige Geschäftsidee. Mit solchen Datenpunkten sollen sich Waren aller Art beziehungsweise deren Verpackung kennzeichnen und so schützen lassen. Denn immer geschicktere Fälschungen verschiedenster Produkte gelangen heute über das Internet, aber auch über nichts ahnende Händler zum Kunden. Solche Plagiate bedeuten nicht allein einen Imageschaden für das betroffene Unternehmen. Handelt es sich um Arzneimittel oder sicherheitsrelevante Ersatzteile, liegt es auch im Interesse der Allgemeinheit, dieser Form von Wirtschaftskriminalität einen Riegel vorzuschieben.

Herzstück der neuen Technik, die unter dem Namen tesa Holospot firmiert, ist das nur ein Quadratmillimeter große Datenfeld auf einem selbstklebenden Film. Der ist freilich nicht mehr handelsüblicher Tesafilm, sondern ein eigens für diesen Zweck produziertes Stück Kunststoff auf Polymerbasis. Auf dieses kleine Feld lassen sich nun mit einem speziellen Laserschreibgerät Informationen speichern, und zwar sowohl in Form eines normalen, jedoch sehr, sehr kleinen Bilds – vergleichbar einem Mikrofilm – sowie, und das ist das Besondere, als digitales Hologramm.

Schon jetzt dienen solche Speicherbilder als Echtheitsmerkmale etwa auf Kreditkarten und Geldscheinen. Die Holospot-Technik soll jedoch ein weiteres Plus an Sicherheit bieten, da sich hier zusätzlich digitale Daten mit einarbeiten lassen. Das gelingt, da die Hologramme nicht wie sonst üblich mit einem aufwändigen optischen Aufbau erzeugt werden, sondern vollständig im Computer generiert und dann von einem speziellen Schreibgerät in den Film gebrannt wer-

Ein Laser überträgt Produktangaben auf die Holospots. Der Holospot speichert Informationen über dieses Arzneimittel als Hologramm. Ein spezielles Lesegerät rekonstruiert das Bild, hier ein Logo, Produktnummern sowie verschlüsselte Daten.

ALLE ABBILDUNGEN: TESA SCRIBOS

Stichwort

Ein Hologramm ist eine zweidimensionale Abbildung eines räumlichen Objekts, aus der sich ein dreidimensionales Bild rekonstruieren lässt. Das gelingt, da ein Hologramm nicht nur die Information über Frequenz (Farbe) und Amplitude (Intensität) einfallender Lichtwellen speichert, sondern auch deren Phase – das heißt, die »Position« der Wellenberge und -täler der Lichtwellen im Moment des Auftreffens auf den Film.

Im Labor wird kohärentes Licht – in der Regel von einem Laser – in zwei Strahlen aufgeteilt. Der eine beleuchtet das abzulichtende Objekt, der andere dient als ungestörte Referenzwelle. Durch beider Überlagerung auf einer Fotoplatte entsteht ein Interferenzmuster, das die Phaseninformation der Objektwelle widerspiegelt.

Beleuchtet man das fixierte Interferenzmuster mit der Referenzwelle, entsteht die Objektwelle und ein Betrachter sieht ein räumliches Bild des Gegenstands. Im Unterschied zu der normalen Fotografie, bei der jedem Punkt im Original genau ein entsprechender Bildpunkt auf dem Fotopapier zugewiesen wird, sind jedoch in jedem Teil des Hologramms Informationen über das gesamte abgelichtete Objekt gespeichert.

den. Bei tesa scribos spricht man deshalb auch von Lithogramm, da die Informationen gezielt in das Material geschrieben werden. Das bietet Vorteile, denn so lassen sich bestimmte Effekte erzeugen, die im Labor gar nicht oder nur mit sehr vielen Tricks möglich sind. Dabei können sich beispielsweise durchaus Hologramm und reales Bild überlagern. Durch eine Lupe betrachtet wäre etwa das Logo des Herstellers zu erkennen, bestrahlte man den Fleck jedoch mit einem Laserpointer, ließe sich die holografische Information rekonstruieren.

Ein Kilobyte im Datenfleck

Bei einer Leistung herkömmlicher Laserpointer im Bereich von Milliwatt wäre dieses Bild im Freien und bei Sonnenschein aber kaum zu erkennen. An Stelle eines Laserpointers verwenden die Entwickler deshalb meist ein Lesegerät mit einem CCD-Chip. Diese auch in Digitalkameras verwendete Elektronik liest aus dem rekonstruierten Bild die digitalen Informationen aus. Seriennummern, Herstellerkürzel, Produktcodes – die Möglichkeiten sind nahezu unbeschränkt. Bis zu einem Kilobyte Information lassen sich dem kleinen Datenfleck mitgeben. Der Vergleich der im Hologramm versteckten Daten mit offen einsehbaren kann dann die Echtheit eines Produkts bezeugen.

Doch ist das digitale Speicherbild auch sicher vor Kopier- und Manipulationsversuchen? Laut Noehte gestaltet sich die Fälschung eines Holospots als extrem schwierig. Denn die Hologramme liegen nicht an der Oberfläche, vielmehr sitzt die Information im Material und lässt sich deshalb nicht ohne weiteres kopieren. Die hohe Auflösung erschwert Fälschern das Handwerk zusätzlich. Unterstrukturen, die im Bereich von hundert Nanometern liegen und zur Qualität des Hologramms beitragen, lassen sich mit einem Lichtmikroskop nicht mehr ausmachen geschweige denn kopieren.

Bleibt die Frage, ob sich diese Technik durchsetzen wird. Erklärtes Ziel von tesa scribos ist der Massenmarkt mit Stückzahlen, die in die Millionen gehen. Deshalb sollen die Kosten für einen Holospot im einstelligen Cent-Bereich liegen. Letztlich hängt das auch von den Wünschen des Auftraggebers ab. Ein zusätzlicher Kratzschutz, eine spezielle Farbgebung oder die Zerstörung des Holospots bei unbefugter Manipulation schlägt zusätzlich zu Buche. Die Lesegeräte sollen preislich in der gleichen Liga spielen wie Laserscanner für das Auslesen von Barcodes. Außerdem soll es ein Gerät geben, mit dem sich die Informationen direkt ins Auge projizieren lassen.

Auch die Idee des tesa-ROMs wird noch verfolgt, wie Noehte gegenüber Spektrum der Wissenschaft bestätigte. Ende dieses Jahres komme man in die Lizenzierungsphase. Vielleicht drehen sich also irgendwann tesa-Rollen in Notebook, PC und Co. Ausgeliefert werden sie dann sicherlich in einem Karton, auf dem einer kleiner Holospot prangt. ◁

Thorsten Krome ist Physiker und Redakteur bei »Spektrum direkt«.

ANZEIGE

Kollektive Intelligenz der Kleinstcomputer

Sie sind winzig, nicht besonders leistungsfähig und stets knapp mit Energie. Aber sie können ihre Umgebung wahrnehmen und sich untereinander verständigen. Dadurch wird aus einer Ansammlung von Primitivrechnern ein Forschungs- und Überwachungsinstrument mit völlig neuen Qualitäten.

Von David E. Culler und Hans Mulder

Heutzutage verhätscheln wir unsere Computer. Sie sind empfindsam und teuer, und meistens haben sie einen Besitzer, der sich um sie kümmern muss. Wer viele von ihnen vernetzen will, muss einen Experten heranziehen und viel Geld dafür ausgeben. Die Welt der Computer ist eine »beschützende Werkstatt«, die mit der echten Welt der Vögel und Bäume, der Schiffe und Brücken nur sehr wenig Kontakt hat.

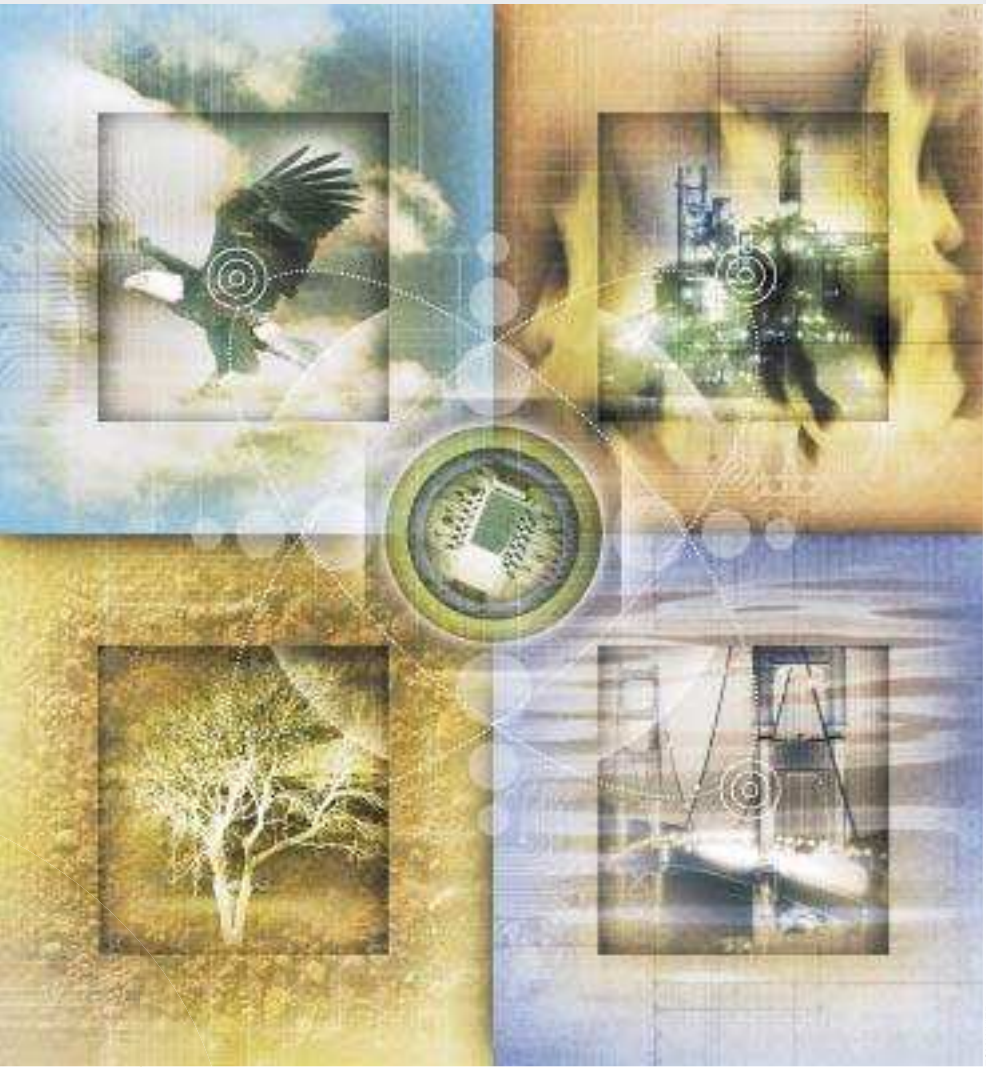
Und diese wenigen Kontakte müssen sorgfältig auf die Bedürfnisse der Computer angepasst werden. Die Piepkasse im Supermarkt reagiert auf die Streifencodes, die eigens dafür auf alles Verkäufliche aufgedruckt werden. Für wertvollere Stücke, wie zum Beispiel ganze Paletten in Lagerhäusern, erfüllen Mikrochips, die auf Funkwellen reagieren (RFID, *radio-frequency identification*), denselben Zweck. Die so gekennzeichneten Paletten müssen dann dicht an den wenigen Lesegeräten vorbeigeschleust werden, damit Computer ihren Ein- oder Ausgang buchen können.

Über mikroelektronische Geräte eines neuen Typs soll nun dem Computer der Zugang zu Gegenständen des täglichen Lebens gewaltig erleichtert werden. Unsere Forschungsgruppen an der Universität von Kalifornien in Berkeley und bei dem Chiphersteller Intel, dazu einige Start-up-Firmen und andere Universitäten, machen aus einem einfachen Computer mitsamt Radiosender und -empfänger eine kleine, autonome Einheit.

Autonome Rechenstäubchen

Wir nennen sie »Mote« nach dem englischen Wort für Stäubchen, und ihr Betriebssystem heißt »TinyOS«, weil es so winzig *(tiny)* ist. Sowie ein Mote eingeschaltet wird, stellt es eine Verbindung mit seinen Nachbarn her. Dadurch entsteht ein räumlich weit gespanntes Netz, das trotz der sehr begrenzten Fähigkeiten seiner Teile erstaunliche Leistungen erbringt. Wenn jedes Mote über einen primitiven Sensor verfügt, wird das Netz zu einer globalen Wahrnehmung fähig und kann Aufgaben bewältigen, zu denen kein normales Computersystem in der Lage wäre.

Die drahtlosen Geräte sind so erschwinglich und zugleich so leistungsfähig, dass man zum Beispiel ein neues wissenschaftliches Instrument erschaffen kann, indem man Dutzende von ihnen an die Äste eines Mammutbaums bindet. Wir nennen es »Makroskop«; es erfasst das Mikroklima in der Umgebung des ganzen Baums, und mehrere gut verteilte Makroskope zusammen ergeben einen Überblick über den ganzen Wald. Im vergangenen Sommer haben Biologen 150 batteriegetriebene Motes innerhalb und außerhalb der Nester von Seevögeln ausgelegt. Mit den gewonnenen Detaildaten können die Ökologen abklären, warum die Vögel genau dort und nicht woanders ihre Eier ausbrüten.



TOM WHITE

Die drahtlos verbundenen Kleinstcomputer sammeln die Daten nicht nur und verarbeiten sie; sie finden auch einen geschickten Weg für die Daten durch das Nachbarschaftsnetz bis zu einer Basisstation, die mit dem Internet verbunden ist. Diese spezielle Eigenschaft ist nicht nur interessant auf einer einsamen Insel mit Vogelbrutplatz, sondern sogar in den Produktionshallen von Intel. Tausende von Motes sollen dort kritische Prozesse beobachten und teure Produktionsausfälle verhindern.

Wenn mit der hohen Geschwindigkeit, die in der Halbleitertechnik üblich ist, die Preise für Motes fallen und ihre Leistungen anwachsen, gerät eine große Zahl von Anwendungen für diesen neuen Maschinentyp in den Bereich des Machbaren: Erhöhung der Produktivität, neue Wege für die wissenschaftliche Forschung und neue, kreative Reaktionen auf Katastrophen oder Umweltprobleme. Auch die militärische Nutzung bleibt nicht aus.

Uns ist allerdings klar, dass bis zu solch hoch gesteckten Zielen noch viel Arbeit vor uns liegt. Ein Mote ist nicht einfach ein sehr kleiner PC; jede Tätigkeit des Systems, von der Ausführung von Programmen bis zum Datenaustausch, muss auf einen minimalen Bedarf an Energie, Platz und Kosten hin optimiert werden. So gilt die Faustregel, dass jedes Gerät rund 99 Prozent der Zeit schlafen und nur in dem verbleibenden Prozent seine Energie verbrauchende Arbeit verrichten sollte.

Die Natur ist nicht computerfreundlich. Um im Freien oder auch in einer Produktionshalle zu funktionieren, müssen Computer »abgehärtet« werden: Eine Außenhülle schützt die Elektronik vor Wetter, Schmutz, wilden Tieren und Stößen. Die Sensoren müssen allerdings der Umgebung ausgesetzt bleiben, die sie beobachten. Motes haben deshalb kleine, billige Schalen und enthalten wesentliche Bauteile mehrfach, um die Verlässlichkeit zu erhöhen.

Computer in der Wildnis

Insgesamt sollen sie billig sein, damit man sie in so großer Zahl aussetzen kann, dass detaillierte Informationen über die Umgebung zusammenkommen. Ein Netz aus Motes ist so dicht geknüpft, dass es den Ausfall einiger Knoten verschmerzen kann, und so intelligent, dass es sich der neuen Situation anpasst und weiter funktioniert. Verluste und unberechenbare Naturgewalten von vornherein einzuplanen ist eine ungewohnte und schwierige Forderung; deren Erfüllung verspricht jedoch reichen Lohn.

In einem Pilotprojekt zur Weiterentwicklung der Technik studieren wir seit zwei Jahren gemeinsam mit Biologen einen Schwarm von rund 18 000 Wellenläufern *(Oceanodroma leucorhoea)* auf Great Duck Island, einer kleinen unbewohnten Insel vor der Küste des nordöstlichen US-Bundesstaats Maine. Die Vögel dieser Seeschwalbenart leben auf See, fliegen aber jeden Sommer an Land, um ihre Eier zu legen und ihre Küken aufzuziehen. Sie nisten in unterirdischen ▷

IN KÜRZE

- Ein **Mote** ist ein daumengroßer Computer mit **Mikroprozessor**, Speicher, Funksender und -empfänger, eigener Stromversorgung und diversen Messgeräten (Sensoren).
- **Motes sind so billig,** dass sie zu Tausenden in Produktionsstätten, landwirtschaftlichen Betrieben oder in der freien Natur ausgelegt werden können. Jedes von ihnen nimmt eigenständig Messdaten auf, kann sich aber mit seinesgleichen zu einem **wahrnehmungsfähigen Netz** verknüpfen.
- Firmen wie Crossbow und Intel stellen bereits Motes her. Sie wurden in wissenschaftlichen Pilotprojekten zur Beobachtung von **Seevögeln und Mammutbäumen** eingesetzt. Weitere Anwendungen werden zurzeit entwickelt: Überwachung von Vibrationen bei Produktionsmaschinen, von **Materialermüdung** bei Brücken und von **Bewohnern von Altenheimen**.

▷ Bauten, die sich an speziellen Stellen der Insel häufen. Man möchte verstehen, warum sie genau diese Brutstellen wählen; neben dem Erkenntnisgewinn würde das auch den Maßnahmen zum Schutz der Tiere aufhelfen.

Wie häufig in der Biologie sind es die lokalen Umweltbedingungen, auf die es ankommt. Einen Wellenläufer interessiert nicht, welche Durchschnittstemperatur und -luftbewegung auf der Insel herrscht, sondern wie kuschelig der spezielle Platz ist, an dem er sein Nest gräbt. Wahrscheinlich gibt es noch andere relevante Größen; deshalb würden die Biologen gerne die Feuchtigkeit und den Lichteinfall innerhalb der Bauten und direkt daneben messen. Und all das über die gesamte Brutsaison, damit man die Daten mit der Größe des Geleges und dem Verhalten der Elternvögel in Beziehung setzen kann.

Die Biologen erwarten eine Menge von unserer Technik: Um für diese und viele andere Anwendungen zu taugen, muss jedes Mote mit einem Satz von Sensoren augestattet sein. In diesem Fall zeichnen Temperatur-, Luftdruck- und Feuchtigkeitsmesser die Bedingungen in ihrer unmittelbaren Umgebung auf, während passive Infrarotsensoren die Gegenwart von (warmen) Vögeln und Eiern registrieren. Gleichwohl darf das Gerät nur ein paar Zentimeter groß sein, um die Vögel und ihre Küken nicht zu stören. Es muss drahtlos arbeiten, da man ein hektargroßes Brutgelände nicht verkabeln kann. Die Batterie muss eine ganze Brutsaison lang durchhalten. Und zu guter Letzt muss das System ohne menschlichen Eingriff funktionieren.

CHARLES O'REAR

Einige Dutzend intelligenter Sensoren, aufgehängt an einem Mammutbaum und automatisch vernetzt, ergeben ein »Makroskop«.

Die Winzlinge geizen mit jedem Milliwatt

Unter all diesen Forderungen ist die härteste die nach der autonomen Energieversorgung. Ein einzelnes Birnchen einer Weihnachtslichterkette verbraucht rund ein halbes Watt. Motes müssen im Schnitt mit einem Zehntausendstel dieser Leistung auskommen, einerlei ob sie ihre Energie aus Batterien, Solarzellen oder, wie eine selbstaufziehende Armbanduhr, aus Bewegungen des ganzen Geräts beziehen.

Eine quadratzentimetergroße Solarzelle liefert bei vollem Sonnenlicht etwa 10 Milliwatt, in Innenräumen sehr viel weniger und in Bruthöhlen gar nichts. Eine typische Knopfzelle speichert etwa drei Wattstunden elektrischer Energie. Der Rechenbetrieb eines Kleinstcomputers verbraucht ungefähr 10 Milliwatt, ein Niedrigenergiesender etwa das Doppelte. Die Leistungsaufnahme vieler nützlicher Sensoren liegt in derselben Größenordnung. Selbst bei dem bescheidenen Verbrauch von 30 Milliwatt hält eine Batterie also weniger als fünf Tage.

Um die knappe Energie zu sparen, verbringt ein Mote 99 Prozent seiner Lebenszeit in einer Art Schlafzustand, in dem der Verbrauch auf einige millionstel Watt absinkt. Einige Male pro Sekunde schaltet das Gerät seinen Funkempfänger ein – und binnen Millisekunden wieder aus, wenn es nichts zu empfangen gibt. Die Sensoren messen Temperatur, Lichteinfall und so weiter nur alle paar Minuten.

Ein einfacher, sehr sparsamer Sensor kann als Wecker für andere dienen. So macht ein Temperatursensor vielleicht einmal pro Minute eine Messung und schaltet nur dann eine Kamera oder ein anderes energiehungriges Gerät auf dem Mote ein, wenn die Temperatur im Nest rasch ansteigt. Denn dann ist wahrscheinlich gerade ein Vogel eingetroffen.

Der eingebaute Prozessor bietet noch andere Möglichkeiten des Energiesparens. Ein einziges Bit über Funk zu senden kostet ungefähr so viel Energie wie tausend Prozessorbefehle auszuführen. Also sammelt das Mote seine Sensordaten und sendet nur gelegentlich Zusammenfassungen: Mittelwerte, Minimal- oder Maximalwerte, wenn es nicht auf die Details ankommt. Verschiedene Motes gleichen ihre Daten untereinander ab und schicken an den Benutzer nur das, was sich aus dem Durchschnitt heraushebt. Dazu müssen sie zwar Funksignale austauschen, aber diese Meldungen können sie so lange zurückhalten, bis es ohnehin Sensordaten zu übermitteln gibt, und sie im gleichen Datenpaket mitschicken.

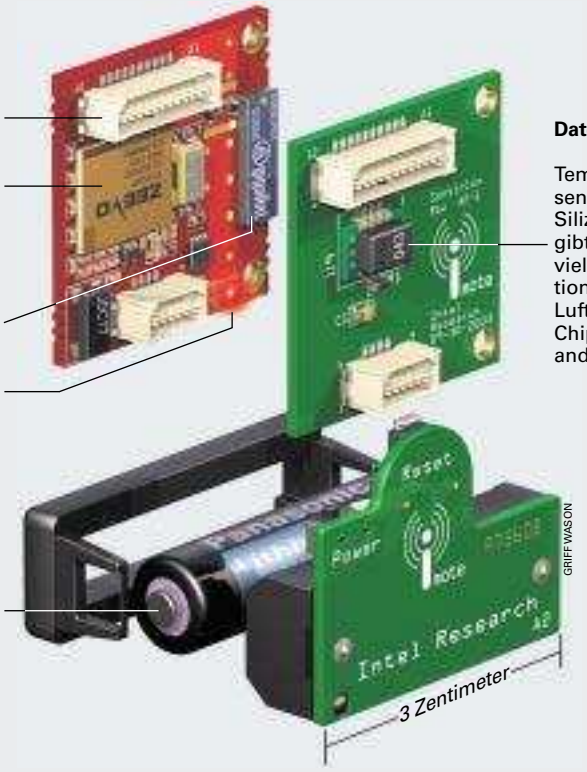
In unserem Projekt auf Great Duck Island haben wir diese und weitere Verfahren, aus der begrenzten Kapazität unserer Winzlinge das Äußerste herauszuholen, erfolgreich getestet. Allein in der Brutsaison 2002 hat unser Makroskop mehr als eine Million Messwerte geliefert und damit das Bild der Biologen über eine entscheidende Phase im Leben der Wellenläufer um viele Details bereichert. Ebenso wichtig ist, dass die Wissenschaftler auf diese Weise die Vögel beobachten konnten, ohne sie durch ihre Anwesenheit zu verstören.

Für einen Computer ist ein Mote eigentlich sehr schwachbrüstig. Sein Mikrocontroller verarbeitet vier bis zehn Millionen Anweisungen pro Sekunde, während der kleinste ernst zu nehmende Computer, ein Palmtop, rund 400 Millionen schafft. Aber im Gegensatz zu diesem können die kleinen Rechenstäubchen ihre schwachen Kräfte spontan zu einem Netz vereinen, das größere Leistungen erbringt als die Summe seiner Teile.

Ein solches System haben wir im April dieses Jahres zusammengebaut, indem wir in einem Wäldchen bei Sonoma in Nordkalifornien 120 Motes in Plastikkapseln an Stämmen und Ästen von Mammutbäumen befestigten. Es geht um ein klares Bild von dem Mikroklima, das die Bäume in ihrer Umgebung durch

Anatomie eines intelligenten Staubkorns

Alles, was ein Computer braucht, passt in eine Streichholzschachtel: Rechner, Speicher, Sensoren, drahtlose Kommunikation und Energieversorgung. Geräte wie das unten abgebildete iMote von Intel sind typischerweise in Steckbauweise konstruiert, sodass eine Recheneinheit je nach Bedarf an sehr verschiedene Sensoren und Batterien angeschlossen werden kann.



Rechen- und Kommunikationseinheit

Standard-Steckverbindung für den Anschluss an verschiedene Bauteile

integrierter Mikrochip mit 12-Megahertz-Prozessor und zwei Speichern mit 64 und 512 Kilobyte Kapazität

Die Radioantenne sendet und empfängt Daten mit 200 bis 600 Kilobit pro Sekunde bei einer Frequenz von 2,4 Gigahertz über eine Entfernung von bis zu 30 Metern.

Eine mehrfarbige Leuchtdiode zeigt den Zustand des iMote an.

Datenerfassung

Temperatur- und Feuchtigkeitssensor sind auf einem einzigen Siliziumchip integriert. Alternativ gibt es Sensorkarten zur Messung vieler anderer Größen wie Vibration, Beschleunigung, Schall und Luftdruck, zum Ablesen von RFID-Chips und zur Kommunikation mit anderen drahtlosen Systemen.

Energieversorgung

Eine Lithium-Ionen-Batterie liefert zwei bis drei Wattstunden elektrischer Energie.

Staubkörner aller Art

Das Mote Mica sitzt auf einem Roboterfahrzeug namens »Robomote«, das in der Universität von Südkalifornien gefertigt wird. Die Kombination wird in mehreren hundert Forschungsprojekten eingesetzt. Ein Sensornetz, das seine Teile selbsttätig bewegen kann, eröffnet nochmals ganz neue Möglichkeiten.

Das Mica2Dot von der Firma Crossbow ist ein auf ein Viertel verkleinertes Mica. Es hat 4 Kilobyte Speicherplatz für Daten, 128 Kilobyte für Programme und einen Sender/Empfänger für 900 Megahertz. Sensoren werden über Kontaktstifte am Rand der kreisförmigen Platine angeschlossen. Diese Motes stecken in den Beobachtungsnetzen für die Mammutbäume und die Seevögel.

Der Prototyp Smart Dust, der in Berkeley entwickelt wird, enthält große Teile des Betriebssystems TinyOS in fest verdrahteter Form. Da Sender/Empfänger und Analog-Digital-Wandler auf höchste Effizienz optimiert sind, kommt das fünf Quadratmillimeter große Gerät mit Energie aus dem Umgebungslicht oder aus mechanischen Erschütterungen aus.

ROBOMOTE: M. FRDL. GENEHM. VON GAURAV S. SUKHATME, U.S.C. EMBEDDED SYSTEMS LABORATORY, MICA2DOT: M. FRDL. GENEHM. VON CROSSBOW TECHNOLOGY, SMART DUST: JASON HILL

ihren Schatten, den Gasaustausch und den Wassertransport erzeugen, und um Änderungen dieses Klimas. In diesem Projekt bestimmen die Kosten die Dichte des Netzes und die Energiereserven seine Lebensdauer. Das Netz wird einige Wochen mit Hilfe von Lithium-Batterien der Größe AA (Standard-Babyzellen für Wecker und Ähnliches) laufen. Das Projekt weist zwei besondere Schwierigkeiten auf: Manche Motes hängen so hoch in den Bäumen, dass sie keinen direkten Funkkontakt zum Boden haben, und es soll möglich sein, sie umzuprogrammieren, wenn sich im Verlauf der Untersuchung neue Fragen auftun.

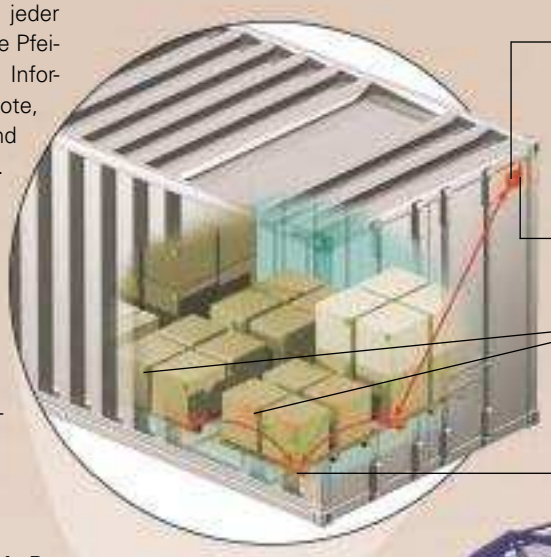
Funken im feuchten Geäst

Die Energiesparsender aus Siliziumchips in den Geräten können Daten ungefähr so schnell wie ein Telefon-Modem senden und empfangen, sind aber auf eine Reichweite von weniger als dreißig Metern begrenzt – manchmal sehr viel weniger. Im Wald schwächen feuchtes Holz und Nadeln die Signale. Ein Mote, das unmittelbar am Stamm hängt, hat oft keinen Funkkontakt zu seinem Nachbarn auf der anderen Seite des Stamms, obgleich der nur ein oder zwei Meter entfernt ist. Möglicherweise muss dieses Mote seine Daten einen Ast höher schicken; von dort springt das Signal über ▷

Zukunftsszenario: ein selbstorganisierendes, intelligentes Sensornetz

Ein großes Containerschiff läuft im Hafen ein. Jeder Container trägt ein Mote, desgleichen jede Palette innerhalb eines Containers. Alle Paletten-Motes eines Containers zusammen bilden ein Netz, das seine Informationen sammelt und an das Mote des Containers übermittelt. Die Container-Motes schließen sich ihrerseits zu einem Netz zusammen. Im Hafen spricht der Zollbeamte über seinen drahtlosen Laptop ein beliebiges Mote aus diesem Netz an und erhält eine Zusammenfassung aller Informationen über die Ladung des Schiffs, einschließlich besonderer Sensorwerte, die eine nähere Überprüfung nahe legen.

1 Ein Mote an jeder Palette registriert mit seinem eingebauten RFID-Lesegerät die Identität und den Ursprung jeder Kiste auf der Palette (grüne Pfeile) und übermittelt diese Information an ein weiteres Mote, das an der Containerwand befestigt ist (rote Pfeile). Dieses sammelt nicht nur die Daten ein, sondern zeichnet mit Hilfe seiner Sensoren auf, ob der Container zu heiß, zu kalt oder zu feucht wird, ob er erschüttert oder – sehr verdächtig – unterwegs geöffnet wird.



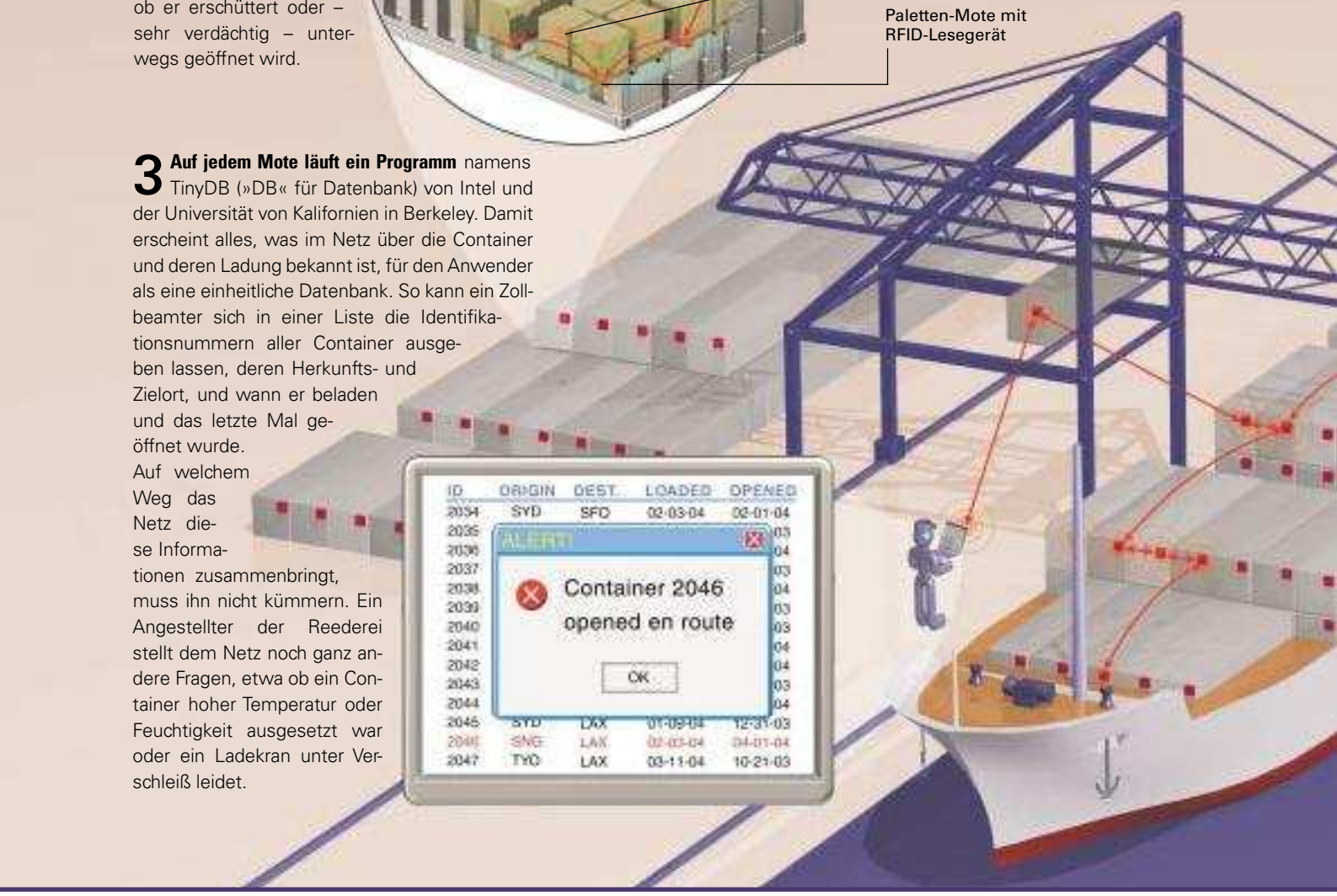
Das Container-Mote verfügt über viele Sensoren. Insbesondere registriert ein Beschleunigungssensor jede heftige Bewegung des Containers, und ein Ultraschallsensor zeichnet jede Veränderung des freien Innenraumvolumens auf, zum Beispiel weil eine Tür geöffnet oder Material entfernt oder hinzugefügt wird.

externe Antenne zur Kommunikation mit anderen Containern

RFID-Schilder *(radio-frequency identification tags)*

Paletten-Mote mit RFID-Lesegerät

3 Auf jedem Mote läuft ein Programm namens TinyDB (»DB« für Datenbank) von Intel und der Universität von Kalifornien in Berkeley. Damit erscheint alles, was im Netz über die Container und deren Ladung bekannt ist, für den Anwender als eine einheitliche Datenbank. So kann ein Zollbeamter sich in einer Liste die Identifikationsnummern aller Container ausgeben lassen, deren Herkunfts- und Zielort, und wann er beladen und das letzte Mal geöffnet wurde. Auf welchem Weg das Netz diese Informationen zusammenbringt, muss ihn nicht kümmern. Ein Angestellter der Reederei stellt dem Netz noch ganz andere Fragen, etwa ob ein Container hoher Temperatur oder Feuchtigkeit ausgesetzt war oder ein Ladekran unter Verschleiß leidet.



GRIFF WASON

2 **Auf die Anfrage** des Zollbeamten hin gibt sich das Netz die Struktur eines Baums. Die Wurzel ist dasjenige Mote, das dem Laptop des Beamten am nächsten ist. Es übermittelt dessen Anfrage an seine Nachbarn, die sie einerseits beantworten, andererseits an ihre weiter entfernten Nachbarn weiterleiten. Zugleich berechnet jeder Knoten im Netz, wie viele Stationen er von der Wurzel entfernt ist. Normalerweise sendet er seine Antwort an den Nachbarn, welcher der Wurzel am nächsten liegt, aber wenn der ausfällt oder zu beschäftigt ist, findet er selbsttätig einen anderen Weg.

▷ mehrere Stationen in die Baumkrone und affenartig von Baum zu Baum, bis es am Rand des Wäldchens endlich zur Speicherung und Analyse von einem leistungsfähigeren Computer in Empfang genommen wird. Dieser steht über das Internet mit einem siebzig Kilometer entfernten Server in Berkeley in Verbindung.

Flüsterpropaganda

In einem Netz aus Hunderten von Motes ist es nicht sinnvoll, jedes einzelne von ihnen in seine Rolle im Netz einzuweisen (es zu »konfigurieren«), wie das bei ortsfesten oder Mobilfunknetzen üblich ist. Vor allem in Firmen, Büros oder landwirtschaftlichen Betrieben werden sie häufig bewegt, sodass man nie weiß, welchem Nachbarn ein Mote seine Signale am besten schicken soll. Deshalb vernetzen sie sich selbsttätig. Auf jedem Mote berechnet ein spezieller Algorithmus, wie viele Stationen es auf verschiedenen Wegen bis zum zentralen Server sind und welcher Nachbar den kürzesten Weg dorthin bietet (Kasten links).

Dieses Kommunikationsprogramm ist in mehrere Teile zerlegt, die auf verschiedenen Motes laufen. Jedes von ihnen muss zwar sein eigenes Betriebssystem haben; aber die üblichen wie Windows oder Unix sind für sie viel zu groß und leistungshungrig. Aus diesem Grund hat Cullers Gruppe in Berkeley TinyOS ersonnen, ein extrem kompaktes, netzorientiertes Betriebssystem, dessen Quelltext inzwischen veröffentlicht und für jedermann verfügbar ist. Im Gegenzug pflegt die verstreute Gemeinde der Nutzer das Programm und entwickelt es weiter (das »Open-Source«-Prinzip).

TinyOS geizt beim Energieverbrauch; es beendet auf der Stelle jedes Anwendungsprogramm, es sei denn, dieses wäre durch bestimmte Ereignisse beschäftigt. Das Betriebssystem ist modular aufgebaut, das heißt in strikt getrennte Teile zerlegt. Ein Teil, den gerade kein Anwendungsprogramm benötigt, wird aus dem Arbeitsspeicher entfernt und schafft damit Platz für Messdaten. Modularität verbessert auch die Stabilität der Geräte, indem es die Wechselwirkungen zwischen Teilen des Betriebssystems begrenzt und damit überschaubarer macht.

Wie aber bringt man diesen chaotischen Haufen wortkarger und in jeder Hinsicht beschränkter Computerchen zu sinnvollem Tun? Wie programmiert man ein Netz von tausend Motes? Das ist auf lange Sicht vielleicht die schwerste Aufgabe. Die Zahl 1000 ist dabei keineswegs aus der Luft gegriffen: Die Firma Intel installiert bereits Prototypen namens »iMote« an Pumpen und anderen Maschinen in ihrem Werk Jones Farm in Hillsboro (Oregon). In dieser Fabrik stehen ungefähr 4000 Geräte, deren Funktion eigentlich regelmäßig überwacht werden sollte; aber zurzeit können die Ingenieure nur alle ein bis drei Monate Stichproben nehmen. Das ist zu selten; vor einiger Zeit versagte ein Gerät in einem Intel-Werk zwischen zwei Vibrationstests und verursachte einen kostspieligen Produktionsausfall. Für deutlich weniger als eine Million Dollar könnte man die ganze Halle mit 4000 iMotes überziehen, die jede Stunde ein komplettes Bild über das Wohlergehen der Anlage liefern, ohne dass ein Kontrolleur einen Fuß in das Gebäude setzen müsste. Allerdings ist besondere Sorgfalt beim Programmieren und Fehlerbeseitigen erforderlich, damit das Verhalten des Netzes beim Anwachsen auf solche Größen überschaubar bleibt.

In einem herkömmlichen Computernetz haben die Beteiligten individuelle Namen und Adressen, und Nachrichten sind adressiert, das heißt an einen bestimmten Empfänger gerichtet. In einem Sensornetz dagegen wird eine Nachricht wie Rundfunk an jeden verbreitet, der sie überhaupt empfangen kann; allerdings hört ein Empfänger nur zu, wenn ihn die Nachricht etwas angeht.

Arbeiten nur auf Anforderung

Kürzlich hat eine gemeinsame Arbeitsgruppe von Intel und der Universität von Kalifornien in Berkeley eine Software namens TinyDB (»winzige Datenbank«) geschrieben, die aus einem Sensornetz eine Art Datenbank macht. Ein Benutzer kann eine Anfrage an das ganze Netz richten, beispielsweise: »Zeige mir alle Vibrationen zwischen 40 und 120 Hertz oberhalb einer gewissen Mindeststärke.« Über den »Buschfunk« wird die Anfrage von Mote zu Mote weitergereicht, bis sie alle Sensoren erreicht hat.

Motes, die keinen Vibrationssensor haben, ignorieren die Anfrage; andere, die gerade »geschlafen« haben, schalten ihre Sensoren ein. Außerdem schauen alle Motes mit Vibrationssensor nach entsprechenden Daten in ihrem Speicher, berechnen Durchschnitte oder ▷

Prototypen sensorischer Netzwerke

Zweck	Sensoren für	Anzahl der Knoten	Betreiber
beobachtet Wetter und Nestbauverhalten von Seevögeln auf Great Duck Island (Maine)	Temperatur, Feuchtigkeit, Infrarot	150	Intel, Universität von Kalifornien in Berkeley (UCB)
analysiert die Aktivität der Bewohner von Altenheimen in Portland (Oregon) und Las Vegas	Bewegung, Druck, Infrarot	130	Intel
panzerbrechende Minen verständigen und verlagern sich, um Lücken im Minenfeld zu schließen	Ort, Orientierung, Beschleunigung	96	DARPA (Forschungsagentur des US-Verteidigungsministeriums)
sammelt Aufzeichnungen des Mikroklimas um Mammutbäume	Temperatur, Feuchtigkeit, Licht, Luftdruck	80	Intel, UCB
überwacht die Leistung von Pumpen und Schleifmaschinen in einer Mikrochipfabrik	Vibrationen, Drehzahlen	70	Intel, UCB
zeichnet Wachstumsbedingungen und Empfindlichkeit für Pilzbefall in einem Weinberg auf	Temperatur	65	Intel
zeichnet Mikroklima im Reservat James San Jacinto Mountains (Kalifornien) auf	Temperatur, Feuchtigkeit, Niederschlag, Licht, Wind	30	Universität von Kalifornien in Los Angeles (UCLA)
horcht nach Schüssen und errechnet die Abschussposition	Schall, Druckwellen, Position	45	DARPA, Vanderbilt-Universität in Nashville (Tennessee)
beobachtet die Bewegungen der Golden-Gate-Brücke	Vibrationen, Beschleunigung	in der Entwicklung	UCB

▷ Ähnliches und senden ihre Ergebnisse in Richtung Hauptrechner. Der kann, mit reichlich Software und Rechenkapazität ausgestattet, Analysen aller Art an den Daten ausführen und am Ende dem Benutzer nützliche Auskünfte geben, zum Beispiel welche Maschine dringend gewartet werden sollte.

Bei den Mammutbäumen sind die Biologen hauptsächlich an großräumigeren Mustern interessiert: Im Tagesrhythmus steigen und fallen scharfe Temperatur- und Feuchtigkeitsfronten; die dadurch entstehenden starken Gradienten liefern vermutlich den Antrieb für den Strom der Nährstoffe. Um diese Fronten zu verfolgen, tragen die Motes ihre Daten zusammen und suchen gemeinschaftlich nach räumlichen Mustern.

Während die Wissenschaftler und Ingenieure aus ihren Beobachtungen durch das »Makroskop« lernen, kommen immer wieder neue Fragen auf – und damit neue Aufgaben für das Netz. Wie installiert man neue Programme auf jedem einzelnen Mote?

Wir haben das Prinzip von den Internet-Viren und -Würmern abgeschaut. Ein neues Programm wird in einer bestimmten Form verpackt und an den Hauptrechner übertragen, der es installiert und daraufhin seine Nachbarrechner mit dem Paket »infiziert«. Das neue Programm verbreitet sich dann im Netz wie ein Gerücht oder eine Epidemie, allerdings in einer geregelten Form, die überflüssiges Geschwätz vermeidet und die räumliche Verteilung der Motes berücksichtigt.

Little Mote is watching you

Wenn das Epidemieverfahren so gut funktioniert: Was ist, wenn ein Eindringling es für üble Zwecke nutzt? Wie sichert man ein Sensornetz gegen Hacker, Viren und Lauscher? Das ist eines der größeren Probleme dieser Technik. In TinyOS ist ein Verfahren eingebaut, das die Identität eines Motes gegenüber seinesgleichen überprüft und bestätigt. Dazu muss aber jedes Mote mit einem individuellen, geheimen Schlüssel ausgestattet werden.

Die besondere Konstruktion der Sensornetze könnte ein Einfallstor für ganz andere Angriffe bieten, als wir bisher aus dem Internet kennen. Es gibt allerdings auch neue und interessante Abwehrstrategien. Man könnte die Effekte eines Angriffs als eine spezielle Ausprägung der ohnehin vorhandenen Messfehler behandeln. Auf diese Weise arbeitet das Netz als Ganzes weiter, auch wenn ein kleiner Anteil seiner Knoten gestört ist. Aber die Sicherung von Motes wird, wie die Computersicherheit allgemein, ein ständiges Hin und Her zwischen Angreifern und Verteidigern bleiben.

Während wir allmählich Erfahrung mit dieser neuen Art von Werkzeug gewinnen, lernen wir auch, dass es ungewohnte Defekte produziert. Ein Sensornetzwerk bricht kaum je vollständig zusammen, aber wenn einige Knoten ausfallen und andere verrauschte oder verfälschte Daten liefern, kann das gesamte Messergebnis des Systems verschoben oder inkonsistent werden. Wir und andere Computerexperten entwickeln Verfahren, den Gesundheitszustand eines Sensornetzes zu bewerten, indem wir beobachten, wie es auf eine probeweise gesetzte Störung reagiert.

In den nächsten zehn Jahren werden drahtlose Sensoren und ihre Netze wahrscheinlich kleiner und unauffälliger werden. Statt in eigenen Kapseln zu sitzen,

werden sie direkt in bestimmte Materialien und Geräte eingearbeitet werden. Viele werden ihre Energie unmittelbar aus ihrer Umgebung beziehen. Nahezu unbemerkt werden diese Winzlinge Häuser, Arbeitsplätze, landwirtschaftliche Flächen, Bahnhöfe, Flugplätze und Supermärkte durchdringen und die Anwesenheit, die Bewegung und, bis zu einem gewissen Grade, sogar den körperlichen Zustand jedes Menschen in ihrer Nähe ermitteln können. Das wirft schwere Bedenken zum Datenschutz auf. Bei der Einführung der passiven RFID-Chips hat die entsprechende Diskussion ja bereits eingesetzt. Nicht dass man sich um die Privatsphäre von Mammutbäumen, Seevögeln oder elektrischen Pumpen sorgen müsste; aber in anderen Feldern wird zwischen dem Nutzen der Technik und der Gefahr des Missbrauchs sorgfältig abzuwägen sein.

Wir sind zuversichtlich, dass diese Probleme in naher Zukunft überwunden sein werden. Die Mote-Technik ist einfach zu wichtig und verspricht zu großen Nutzen allenthalben, als dass man sie ignorieren oder schlicht verbieten könnte. ◁

David E. Culler ist Professor der Computerwissenschaften an der Universität von Kalifornien in Berkeley und war der Gründungsdirektor des Intel-Forschungszentrums in Berkeley. Seit zehn Jahren arbeitet er an der Koordination vieler einzelner Computer zu enger Zusammenarbeit.

Hans Mulder ist einer der Direktoren der Forschungsabteilung von Intel und Koordinator der Kooperation mit Universitätslaboren. In dieser Eigenschaft treibt er besonders die Forschung an allgegenwärtigen Computern *(ubiquitous computing)* und verteilten Systemen voran.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Query processing in sensor networks. Von Johannes Gehrke und Samuel Madden, in: Pervasive Computing, Bd. 3, Nr. 1, S. 46, Januar 2004

The emergence of networking abstractions and techniques in TinyOS. Von David Culler et al., in: Proceedings of the first USENIX/ACM symposium on networked systems design and implementation. USENIX, 2004

Mica: a wireless platform for deeply embedded networks. Von Jason Hill und David Culler, in: IEEE Micro, Bd. 22, Nr. 6, S. 12, November/Dezember 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Kühe im Sensornetz

Von Norbert Aschenbrenner

Im deutschsprachigen Raum befassen sich mehrere Arbeitsgruppen mit Sensornetzen. Die Projekte reichen von der Gebäudetechnik und dem Umweltmonitoring bis zur Überwachung von Tieren.

Noch in diesem Jahr will Jochen Schiller, Professor für Technische Informatik an der Freien Universität Berlin, das Unternehmen Scatterweb gründen, das Sensornetze maßgeschneidert entwickelt und aufbaut. In einem Pilotversuch zusammen mit Veterinären will Schiller demnächst jeder Kuh einer Herde zur Überprüfung des Gesundheitszustands einen Sensor ans Halsband hängen. Das Sensornetz liefert Mittelwerte etwa für die Herzfrequenz und die Körpertemperatur der Tiere. Weichen die Werte einer Kuh signifikant davon ab, kann sie der Tierarzt mit Hilfe der Sensoren lokalisieren und eingehend untersuchen.

»Es ist im Prinzip auch möglich, über verschiedene Messwerte den Stress zu erfassen, der in einer Herde herrscht«, sagt Schiller. Nach Operationen kann der Erfolg einer Behandlung überprüft werden. Weil sich die Tiere auf der Weide in ihrer natürlichen Umgebung aufhalten, sind die so gewonnenen Daten aussagekräftiger. Denn auch für Kühe ist der Besuch des Arztes ein Stressfaktor, was manche Messungen verfälscht.

Schillers weit gehend in Eigenarbeit hergestellte und konfigurierte Sensorknoten kosten derzeit rund 50 Euro pro Stück. Preisziel bei einer Massenfertigung ist 20 Euro. Die Geräte sind etwa so groß wie eine Zigarettenschachtel. »Wir treiben die Miniaturisierung derzeit nicht voran, weil wir das als nicht vorrangig ansehen«, sagt Schiller. »Smart dust« mit Milliarden von Sensoren sei eine fragwürdige Zukunftsvision – aus Umwelt- und aus Datenschutzgründen.

Meeresbiologen der Universität Umeå in Nordschweden untersuchen die Temperatur der nördlichen Ostsee mit einem Sensornetz. Die Knoten stecken in Bojen, die im Meer verteilt sind, messen Luft- und Wassertemperatur und vernetzen sich eigenständig. Dabei sendet jeder Sensor mit ansteigender Funkleistung, bis sich mindestens ein Nachbar meldet. Wenn drei bis vier Nachbarn erkannt wurden, ermitteln diese ihre Lage zueinander. Daraufhin legt das Netz das günstigste Sendeverfahren fest.

Die Brandmelder »SiRoute« finden selbsttätig die besten Wege zur Kommunikation (dargestellt auf dem Monitor im Vordergrund).

SIEMENS-PRESSEBILD

Die Gebäudetechniksparte von Siemens hat bereits ein Brandmeldesystem im Angebot, das mehrere Merkmale eines Sensornetzes aufweist. Die Melder des Systems »SiRoute« enthalten ein Funkmodul und können beliebig in einem Gebäude verteilt werden. Nach dem Einschalten konfigurieren sich die Geräte automatisch. Bei Funkstörungen oder Sabotage findet das Netz selbsttätig einen anderen Weg, seine Meldungen an die Zentrale weiterzureichen. Eine Batterie hält bis zu fünf Jahre, weil inaktive Anlagenteile in einem Energie sparenden Ruhezustand schlummern.

Eher grundlagenorientiert ist das EU-Projekt EYES, dessen Federführung bei der Universität von Twente in Enschede (Niederlande) liegt; ein Team der Technischen Universität Berlin ist beteiligt. Es geht um die Frage, welche Architekturen ein Sensorknoten besitzen sollte und wie ein effizienter Informationsaustausch organisiert wird. Im September startete das EU-Projekt Wisent, in dem zehn europäische Partner unter Führung der TU Berlin Szenarien für die Anwendung von Sensornetzen erarbeiten und dabei sowohl die Industrie wie auch die Öffentlichkeit einbinden wollen.

Der Autor ist promovierter Chemiker und Wissenschaftsjournalist in München.

WISSENSCHAFT IM RÜCKBLICK

1954

Rechenmaschine übersetzt Russisch

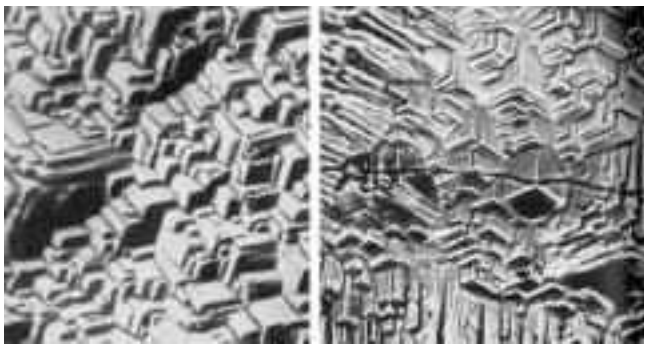
Sprachwissenschaftler des amerikanischen Institutes of Language and Linguistics in Georgetown haben … zum ersten Mal erfolgreich den Versuch unternommen, den Bau einer Übersetzungsmaschine … zu verwirklichen. Man hat … im »Gedächtnis« der Rechenmaschine ein Vokabular von zunächst nur 250 Worten aufgehoben und zusätzlich in der Maschine die sechs wichtigsten Regeln gespeichert, welche im wesentlichen die Satzstellung und zum Teil auch die Grammatik betreffen. Diese Maßnahmen haben es immerhin schon ermöglicht, über 60 verschiedene geeignet ausgewählte kurze russische Sätze in gutes Englisch zu übersetzen. *(Die Umschau, 54. Jg., Heft 20, S. 613, 15. Oktober 1954)*

Rätsel des Grippe-Virus gelöst

Wie Professor Sir Macfarlane Burnet … mitteilt, sind die roten Blutzellen von einem losen Netzwerk großer Moleküle überzogen. Diese … haben Haftstellen, an denen sich Virusteilchen anheften können. Wenn nun ein solches Teilchen an zwei Blutzellen gleichzeitig haftet, kommt jene Zusammenballung zustande, die man im Mikroskop beobachtet … Dabei hat sich ergeben, daß das Virus seiner Wirkung nach ein Enzym ist, das heißt zu jenen zahllosen Wirkstoffen gehört, die im lebenden Organismus bestimmte chemische Umsetzungen auslösen. *(Orion, 9. Jg., Nr. 19/20, S. 28, Oktober 1954)*

Mikroskop zeigt Oberflächenprofil

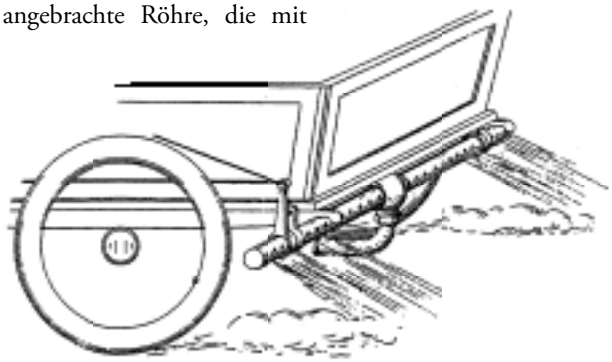
Das … von S. Tolanski entwickelte »Lichtprofil-Mikroskop«, das sich von dem gewöhnlichen Gerät nur dadurch unterscheidet, daß es einen eingebauten Spiegel hat, der das Bild eines Striches … auf das Objekt wirft, ist zu vielen interessanten Anwendungen befähigt … In (der Abbildung) sind die Ätzfiguren von Diamantkristallen wiedergegeben. Das linke Teilbild … erweckt den Eindruck, als beständen die einzelnen Kristalle aus rechteckigen Blöcken … Das Lichtprofil (rechts) … zeigt nun, daß hier etwas ganz anderes vorliegt: es handelt sich um Gruppen triangulärer pyramidenförmiger Eindrückungen, die so zusammengelagert sind, daß sie den Eindruck einer rechtwinkligen Struktur machen. *(Die Neue Zeitung, 10. Jg., Nr. 242, S. 15, 17. Oktober 1954)*

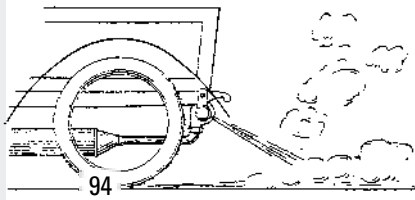


▲ Das Tolanski-Mikroskop macht eine optische Täuschung sichtbar: Scheinbare Erhebungen entpuppen sich als Vertiefungen.

Kampf dem Straßenstaub

Ein französischer Chauffeur … schlägt vor, das Aufwirbeln des Staubes durch einen Apparat zu verhindern, der direkt am Automobil angebracht ist … Man leitet einen Teil des Auspuffgases in eine hinter dem Wagen horizontal angebrachte Röhre, die mit kleinen Oeffnungen versehen ist, durch die die Auspuffgase nach hinten entweichen können. Die Richtung der entweichenden Gase muß so berechnet sein, daß sie den aufwirbelnden Staub förmlich zu Boden drücken. *(Allgemeine Automobil-Zeitung, 5. Jg., Nr. 42, Bd. 2, S. 23, 16. Oktober 1904)*





▲ Mit Hilfe der Autoabgase will der Erfinder Wageninsassen und Passanten vor aufwirbelndem Straßenstaub schützen.

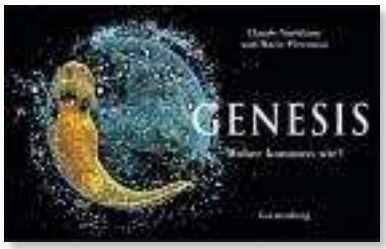
Erfrischt nach Strombetäubung

1904

Dr. Leduc von der medizinischen Fakultät in Paris will den elektrischen Strom an Stelle von Äther oder Chloroform zur … Betäubung … benutzen. Leduc sah sich durch die Ergebnisse bei Hunden, Kaninchen und Tauben so ermutigt, dass er auch an sich selbst die Prüfung des Verfahrens vornahm … Von den Elektroden … wurde eine auf die Stirn, die andere auf den Rücken gelegt, so dass der Strom das Gehirn und das Rückenmark beeinflussen musste. Nach etwa zehn Minuten war vollständige Betäubung eingetreten … Sobald der Strom unterbrochen wurde, erfolgte das Erwachen sofort, das nicht mit Übelkeit, sondern sogar mit einem Gefühl von Frische verbunden war. *(Die Umschau, 8. Jg., Nr. 42, S. 837, 15. Oktober 1904)*

Phöbe tanzt aus der Reihe

Der von Pickering entdeckte Saturnmond Phöbe ist nun seitens verschiedener Sternwarten bestätigt worden … Die Annahme, der neue Himmelskörper bewege sich nicht in demselben Sinne wie fast alle andern Körper unseres Sonnensystems …, sondern gerade entgegengesetzt, … würde zu dem Schlusse berechtigen, dass Phöbe nicht als ursprünglicher Teil der Saturnmasse aufzufassen ist, sondern einst von aussen her dem Saturn zu nahe gekommen und im Bereich seiner Anziehungskraft festgehalten worden ist. *(Die Umschau, 8. Jg., Nr. 44, S. 880, 29. Oktober 1904)*



NATURGESCHICHTE

Claude Nuridsany und Marie Pérennou

Genesis

Woher kommen wir?

Spielfilm, 80 Minuten. Kinostart: 14. Oktober 2004;
Buch zum Film: aus dem Französischen von Cornelia Panzacchi. Gerstenberg, Hildesheim 2004. 144 Seiten, € 24,90

Claude Nuridsany und Marie Pérennou sind berühmt geworden durch erstklassige Naturfotografie mit hohem wissenschaftlichem Anspruch (Spektrum der Wissenschaft 11/1998, S. 164) sowie den Erfolgsfilm »Mikrokosmos«. Nun haben sie – als Regisseure, Drehbuchautoren und Kameraleute zugleich – einen Film über die Entstehung des Lebens auf der Erde produziert; und schon erwartet man Dokumentaraufnahmen samt wissenschaftlicher Erläuterung. Nicht gerade von der wenig leinwandtauglichen Ursuppe, aber vielleicht von Quastenflossern oder anderen »lebenden Fossilien«, deren über Jahrmillionen kaum veränderte Gestalt uns einen Einblick in die evolutionäre Vergangenheit der Erde gibt.

Weit gefehlt! Auf der Leinwand erscheint ein Schamane und trägt dem Publikum eine Erzählung vor: »Eine uralte Legende erzählt von Doppelwesen auf der Erde, am Beginn der Zeit, die männlich und weiblich zugleich waren …« Der Titel »Genesis« ist ernst gemeint. Die Autoren haben sich nicht nur von einem Illustrationsband zum ersten Buch des Alten Testaments inspirieren lassen; sie haben versucht, eine eigene Schöpfungsgeschichte zu erzählen: durchaus basierend auf dem aktuellen Wissensstand, aber in der Form eines Mythos.

Die Darsteller des Films sind Tiere, aber sie spielen nicht nur sich selbst: Schlammspringer, Meerechse, Seepferdchen und viele andere sind lebende Metaphern für Schöpfung, Liebe, Vergänglichkeit oder Tod. Wenn ein Grabfrosch langsam aus dem Schlamm emporwächst (Bild), dann drängt sich die biblische Geschichte von der Erschaffung des Menschen aus einem Lehmklumpen auf – und schon haben die Regisseure eines ihrer Ziele erreicht.

Der Film orientiert sich an den Phasen des Lebens: Entstehung, Fortpflanzung und Verfall. Der Ursprung des Universums wird durch verfremdete Aufnahmen natürlicher Elemente symbolisiert: Kristallwachstum in Wasser, Tröpfchenbildung in Großaufnahme, Sand, Rauch, Seifenblasen und vieles mehr. Gerade hier wird deutlich, dass es sich nicht um eine Dokumentation, sondern um ein Kunstwerk handelt.

Selten habe ich so eindrucksvolle Aufnahmen eines Embryos gesehen. Und hier ist »Genesis« dann doch ein wissenschaftlicher Film. Jean-Marc Levallant, der das Material zu diesen Sequenzen beisteuerte, hat mit Hilfe einer neuen Ul- ▷

Nach dem Ende der Trockenzeit steigt der Grabfrosch aus dem Schlamm – als sei ihm aufs Neue das Leben eingehaucht worden.

Der Liebestanz der Seepferdchen ist graziös, formvollendet und ohne jede Hast.

traschalltechnik, der »3-D-Sonografie«, nicht nur fantastische Bilder erstellt, sondern in den zweieinhalb Jahren, die er dafür investierte, auch neue Erkenntnisse gewonnen und veröffentlicht. So war bis dahin nicht bekannt, dass schon ein zwei Monate alter Embryo auf seinen Knien im Fruchtwasser herumstolziert.

Im letzten Teil, der von der Vergänglichkeit des Lebens handelt, verwandelt sich der Film wieder zur Märchenerzählung: Der Schamane trägt den Gedanken vom Kreislauf allen Lebens vor und stellt Tod und Verfall einerseits als unvermeidliches Ende, andererseits auch als Neubeginn dar.

Der Film »Genesis« nimmt Bilder aus der Natur und passt sie in seine Geschichte ein. Es geht nicht um Verstehen und Lernen, es geht um Sehen, Staunen und Bewundern. Wer vor allem wissenschaftliche Erkenntnis und Fakten erwartet, wird sich verständnislos fragen, was der alte Mann da vorne eigentlich soll. Aber wem das Märchen und das Bilderreich unserer Natur gefällt, der wird sich gefangennehmen lassen. Die einmaligen Aufnahmen von Leben und Natur sind ohne weiteres den Gang zur Kinokasse wert.

Im gleichen Geiste wie der Film ist auch das gleichnamige Buch verfasst. Erwarten Sie nicht, dort die Sachinformationen zu finden, die der Film nicht bietet. Das Buch beeindruckt mit Fotos, umrahmt von einem eher lyrischen Text, in dem die Autoren viel über ihre Motive und Gedanken erzählen, warum sie welche Aufnahmen wie gemacht haben und was sie damit ausdrücken wollten. Ein ganzes Kapitel ist der »Genese des Films« gewidmet. Wen schon der Film fasziniert hat oder wer die Aufnahmen gerne bei sich im Bücherschrank hätte, der wird in dem Buch eine lohnende Ergänzung finden.

Elke Reinecke

Die Rezensentin ist Redakteurin bei wissenschaft-online in Heidelberg.

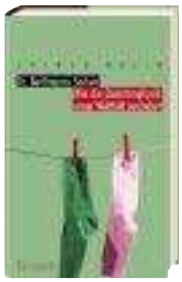
PHYSIK

Shimon Malin

Dr. Bertlmanns Socken

Wie die Quantenphysik unser Weltbild verändert

Aus dem Amerikanischen von Doris Gerstner.
Reclam, Leipzig 2003. 493 Seiten, € 29,90



Ein treffenderer Untertitel für dieses Werk wäre »Wie die Quantenphysik unser Weltbild verändern *sollte*«. Denn der Physiker Shimon Malin von der Colgate University in Hamilton (New York) ist davon überzeugt, dass die physikalischen Errungenschaften des 20. Jahrhunderts einen Paradigmenwechsel vom Kaliber der kopernikanischen Wende auslösen müssten. Aber in einer Art Schizophrenie nehmen wir es hin, dass in den Physiklabors von nebenan ganz ungeheuerliche Dinge geschehen, während wir weiterhin unverdrossen von Materiebausteinen sprechen, als ob es diese kleinen harten Bällchen, von denen Isaac Newton sprach, tatsächlich gäbe.

Dr. Bertlmann, Physikprofessor an der Technischen Universität Wien, trägt nie zwei gleichfarbige Strümpfe. Wenn man sieht, dass der erste rosa ist, weiß man also, dass der zweite sicher nicht rosa sein kann. So macht sich Bertlmann auf die Socken, um das Einstein-Podolsky-Rosen-Experiment zu erläutern. Die von diesem – zunächst fiktiven – Experiment ausgelöste Diskussion ist kennzeichnend für die Physik des 20. Jahrhunderts, weil sie zwischen Albert Einstein als dem Vater der Relativitätstheorie und Niels Bohr als einem der Gründer der Quantentheorie geführt wurde (Spektrum der Wissenschaft 2/2004, S. 32, und 2/1995, S. 50).

Einstein und seine Mitarbeiter Podolsky und Rosen (kurz EPR) versuchten mit diesem Gedankenexperiment eine von ihnen vermutete Unvollständigkeit der Quantentheorie ans Licht zu bringen. Sie wollten zeigen, dass entgegen der Heisenbergschen Unschärferelation Ort und Impuls eines Teilchens prinzipiell gleichzeitig genau bestimmbar seien. Dazu betrachteten sie zwei Teilchen, deren Gesamtimpuls null ist und die sich in entgegengesetzte Richtungen voneinander fort bewegen. Wenn man den Ort an einem und den Impuls am anderen Teilchen misst, dann kann man auf die entsprechende Größe des jeweils anderen Teilchens schließen und somit beide Größen gleichzeitig genau bestimmen.

Bohr entgegnete, dass durch eine Messung an einem Teilchen auch das andere beeinflusst, dass insbesondere beide

erst durch die Messung augenblicklich in einen wohldefinierten Zustand versetzt würden. Diese Sichtweise impliziert eine Fernwirkung zwischen den beiden Teilchen, die Einstein nicht akzeptierte: Wie könnte ein Teilchen ein anderes beeinflussen, ohne dabei die Lichtgeschwindigkeit als oberste Grenze für die Signalübermittlung zu respektieren?

Die Diskussion zwischen Bohr und Einstein währte dreißig Jahre und konnte zu deren Lebzeiten nicht entschieden werden. Erst zwei Jahre nach Bohrs Tod öffnete John Bell mit modifizierten Experimenten einen Weg, der schließlich zu einer Bestätigung der Quantentheorie führte. Bell widerlegte damit seine eigene Vermutung: Die Natur scheint mit uns Verstecken zu spielen, »nature loves to hide« (so der Originaltitel des Buchs).

Shimon Malin macht in seinem Buch dieses Experiment zur Schnittstelle zwischen physikalischem Diskurs und philosophischen Erörterungen.

Materie ist nur eine Erscheinungsform eines allgegenwärtigen Geistes

Die gegenwärtige Physik ist unvollständig, auch wenn die Frage hinter dem EPR-Experiment erledigt ist: Bis heute ist es nicht gelungen, die für die Relativitätstheorie bedeutende Gravitation einerseits und die für Prozesse auf atomarer Ebene bedeutende starke und schwache Wechselwirkung andererseits in einer umfassenden Theorie zu vereinigen.

Dies wird, so Malin, im Rahmen unseres gegenwärtigen Weltbildes auch nicht möglich sein, ebenso wenig wie eine Theorie, nach der die Erde eine Scheibe ist, eine Weltumseglung erklären kann. Vielmehr seien die gegenwärtigen Unzulänglichkeiten Vorboten eines großen Umbruchs (»Paradigmenwechsels«). Dessen Gestalt kennen wir naturgemäß noch nicht, aber die problematischen Züge des bisherigen Modells sehr wohl.

Darunter ist nach Malin vor allem die Trennung zwischen Subjekt und Objekt, die wir jedesmal vornehmen, wenn wir uns als Beobachter aus dem zu Beobachtenden ausschließen. Die Naturgesetze wenden wir als ein totes Prinzip auf ein Uhrwerk-Universum an, ohne die Lebendigkeit darin zu erkennen.

Malin dagegen stellt die »leblosen Materiebausteine« Newtons in Frage. In Anlehnung an den Neuplatoniker Plotin (um 205–270 n. Chr.) betrachtet er Materie nur als die niedrigste Erscheinungsform eines allen innewohnenden Geistes *(nous)*.

Den Gedanken des lebendigen Universums führt Malin etwas plötzlich, aber keineswegs unüberlegt ein. Freilich haben wir davon, dass die Erde ein Organismus ist, schon an anderer Stelle gehört (das »Gaia-Prinzip« von James Lovelock), aber neu ist, wie Malin Lebendigkeit definiert. Selbsterhaltung und Reproduktion, die als Kriterien schon immer problematisch waren, weil Computerprogramme sich selbst reproduzieren und Lebewesen steril sein können, lässt er außen vor, um auf die Fähigkeit der Beziehungnahme als den Kernpunkt der Lebendigkeit hinzuweisen. So gesehen können auch Kunstobjekte lebendig sein, wenn sie auf den Betrachter »ansprechend« wirken.

Lebendig wirkt auch Malins Buch. Denn obwohl der Autor jung genug ist, um spritzig zu schreiben, ist er schon lange genug Wissenschaftler, um Fakten der Physikgeschichte als eigene Erlebnisse schildern zu können. So lesen wir von Bohrs starkem dänischen Akzent ebenso wie von Diracs Wortkargheit.

Das hier vorliegende Buch ist seine erste populärwissenschaftliche Arbeit und zugleich ein schriftstellerisches Kunstwerk. Wie bei den einander zeichnenden Händen von M. C. Escher kommt das Gesagte unmittelbar zur Anwendung, wenn der Autor selbst in seinem Buch erscheint – als dritter Diskussionspartner in den nicht nur lehrreichen, sondern vor allem humorvollen Streitgesprächen zwischen den Astronauten Julie und Peter. Welcher Malin ist denn nun das Subjekt, welcher das Objekt, und wie wirklich ist dieses sich zankende Liebespärchen?

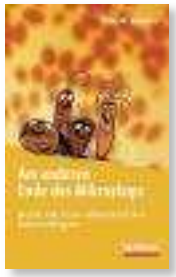
Erleichtert und gleichzeitig verwundert mag der Leser feststellen, dass der Autor jegliches Guru-Gemurmel und Religionsgefasel vermeidet, obwohl er doch immer wieder von dem einen Geistigen spricht, das aller materiellen Erscheinung zu Grunde liegt. Als Schlusspointe hebt Malin es sich auf, dieses Einmalige ein einziges Mal als das Göttliche zu bezeichnen.

Sabine Stöcker

Die Rezensentin ist Physikerin und promovierte Mathematikerin. Sie war zuletzt als Dozentin an einer Fachhochschule bei Tel Aviv tätig und wird zurzeit von ihren Zwillingsbuben beschäftigt.

ANZEIGE

MIKROBIOLOGIE



Elmer W. Koneman

Am anderen Ende des Mikroskops

Bericht vom ersten außerordentlichen Bakterienkongress

Aus dem Englischen von Thomas Lazar.
Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2003. 260 Seiten, € 19,95

Lassen wir doch einmal Bakterien erzählen, wie sie die Welt und den Menschen aus ihrer Sicht erleben. Oben sei unten, Kleines ganz groß und alles aus einer ganz ungewohnten Perspektive – das mag der Leitgedanke des emeritierten Pathologieprofessors Elmer W. Koneman aus Colorado gewesen sein. Der Autor beschreibt einen wissenschaftlichen Kongress; aber dieses Mal sind die Mikroorganismen nicht Gesprächsthema, sondern selbst die Teilnehmer. Eine hervorragende Idee, die neugierig macht auf den Tagungsband.

Sitzung für Sitzung, Kapitel für Kapitel lässt Koneman einen Vertreter der Prokaryonten zu Wort kommen, inklusive der üblichen Höflichkeiten zu Beginn und Ende jedes Beitrags. Wenn Menschen sich auf Kongressen über Bakterien auslassen, werden diese wohl über die forschenden Zweibeiner berichten, dachte ich mir voller Vorfreude auf einen satirischen Blick vom Objektiv des Mikroskops zum Okular.

Doch der Titel des Buchs führt in die Irre: Es handelt sich um eine Reihe von »Insiderberichten«. Über Lebensräume, Strukturen, menschliche Krankheiten, Antibiotika und wie man als Prokaryont damit fertig wird, sowie zum Schluss doch ein wenig Satire: die Umbenennung des *Homo sapiens*, der seiner Artbezeichnung so gar nicht gerecht wird. Immer noch ein schönes Programm, wenn es denn ansprechend präsentiert wird.

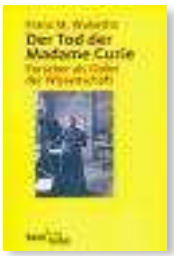
Aber bereits die Geleitworte des Hitze liebenden Bakteriums *Thermotoga maritima* enthalten nur ein paar mühsam zusammengesuchte Witze zu der durchaus interessanten Grundidee. Die Fülle der dabei benutzten, aber nur selten erklärten Fachwörter macht die vereinzelten Pointen zu Insidersprüchen.

Im Hauptteil sieht der Leser sich mit nur mäßig getarntem Lehrbuchwissen der Mikrobiologie in gestauchter Form konfrontiert. Da erläuternde Abbildungen fast völlig fehlen, fragt sich der Fachmann, warum er das alles noch einmal wiederholen sollte, und der Laie, wovon hier überhaupt die Rede ist.

Wie *Micrococcus luteus* selbst bemerkt, sinkt daher die Stoffwechselaktivität des Publikums auf einen sehr niedrigen Wert ab. Vergeblich wedelt *Enterobacter aerogenes* mit den Flagellen, um die »Anzeichen von Mattigkeit« zu bekämpfen. Man fragt sich, warum Koneman sein Konzept bis zum Ende des Buchs durchgezogen hat, wenn ihm doch anscheinend selbst aufgefallen ist, wie wenig spannend die Darstellung ist. Von einem vergnüglichen Wissenstransfer fehlt jedenfalls jede Spur.

Olaf Fritsche

Der Rezensent ist promovierter Biologie und freier Wissenschaftsjournalist in Walldorf.



WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

Franz M. Wuketits

Der Tod der Madame Curie

Forscher als Opfer der Wissenschaft

C. H. Beck, München 2003. 166 Seiten, € 12,90

Wir werden den Scheiterhaufen besteigen und wollen lieber brennen, als unseren Überzeugungen zu entsagen.« Mit diesem pathetischen Zitat des russischen Genetikers Nikolaj Ivanovich Vavilov (1887 – 1943) beginnt eine etwas makabre Zusammenstellung: Franz Wuketits stellt in knappen Biografien 28 Wissenschaftler vor, die ihrem Forscherdrang direkt oder indirekt zum Opfer gefallen sind. Das Zitat ist allerdings nicht repräsentativ, denn den Mythos des sich aufopfernden Wissenschaftlers, der für seine Forschung mit Freude den frühen Tod in Kauf nimmt, kann und will das Buch nicht stützen.

Während extreme Risikobereitschaft noch am ehesten bei einem Seefahrer und Entdecker wie James Cook (1728–1799) oder einem Polarforscher wie Alfred Wegener (1880–1930) zu finden ist, hat den meisten anderen die Unkenntnis von Risiken den vorzeitigen Tod gebracht. So auch der zweifachen Nobelpreisträgerin Marie Curie (1867–1934), die ohne die heute üblichen Vorsichtsmaßnahmen mit radioaktivem Material arbeitete und, letztlich als Folge der großen Strahlendosis, an Blutkrebs starb.

Weitere »klassische« Forschungsopfer sind Georg Wilhelm Richmann (1711–1753), den der Blitz erschlug, als er versuchte, dessen Elektrizität zu messen, oder die beiden Chemiker Johann Rudolph Glauber (1604–1670) und Carl Wilhelm Scheele (1742–1786), die vermutlich einer Quecksilbervergiftung

Francis Bacon starb im Dienste der Wissenschaft – an Erkältung

zum Opfer fielen. Francis Bacon (1561–1626), ein großer Erneuerer der Naturwissenschaft, fand ein sehr banales Ende: Um die Verzögerung der Fäulnis durch Kälte zu demonstrieren, stopfte er ein Huhn mit Schnee aus und zog sich dabei eine schwere Erkältung zu, die ihn das Leben kostete.

Aber Franz Wuketits, Biologe und Wissenschaftstheoretiker mit Professuren in Wien und Graz, hat nicht viele direkte Opfer der Wissenschaft gefunden. Zahlreiche Todesfälle kann er nur mit einigen argumentativen Verrenkungen als Folge wissenschaftlicher Tätigkeit plausibel machen. Zudem fehlen neuere Beispiele: Nur einer der »Helden« ist nach dem Zweiten Weltkrieg gestorben.

Wissenschaft ist aber auch heute noch ein Risiko. Allerdings ist Wuketits ein Vielschreiber, mit einer langen Bücherliste mit Titeln wie »Warum uns das Böse fasziniert« oder »Naturkatastrophe Mensch«. Da dürfte ihm die Zeit für gründlichere Recherchen nach jüngeren Opfern gefehlt haben.

Gleichwohl enthält das Buch einige spannende und aufschlussreiche Geschichten, die dem Leser einen guten Einblick in die Pionierzeiten einzelner Wissenschaftsdisziplinen bieten.

Felix Straumann

Der Rezensent ist freier Wissenschaftsjournalist in Zürich.

ANZEIGE

BIOLOGIE

Eberhard J. Wormer

Mehr Wissen über … Stammzellen

Lingen, Köln 2003. 90 Seiten, € 8,95

Die Forschung mit menschlichen Stammzellen ist eines jener kontroversen Themen, bei denen man sich als Wissenschaftler die interessierte Öffentlichkeit besser informiert wünscht. Dann verstünde sie zum Beispiel, dass die Befruchtung der Eizelle nur ein Schritt auf dem Weg zum Leben ist und die Einnistung der Blastozyste in der Gebärmutter, etwa sieben Tage nach der Befruchtung, nur mäßige Erfolgschancen hat, wenn sie nicht gar durch die Spirale ganz verhindert wird. Dass somit bei der Erzeugung embryonaler Stammzellen aus Blastozysten nicht ein zukünftiges, sondern nur ein eventuell mögliches Leben verhindert wird, wie bei der Verhütung mit der Spirale. Andererseits wünscht man sich auch, dass die kritische Öffentlichkeit die Segensversprechungen der Stammzellforscher als Äußerung einer optimistischen Hoffnung verstehe und nicht gleich als eine einklagbare Prognose.

Aus solchen Kommunikationsbedürfnissen und -wünschen heraus ist offenbar das vorliegende Büchlein entstanden, das von der Helmut und Ruth Lingen-Stiftung – einer »Stiftung zur Förderung der medizinischen Wissenschaft und Forschung« – konzipiert und in Auftrag gegeben wurde. Der üppig bebilderte und ansprechend gestaltete Band liefert zunächst im Schnelldurchlauf auf etwa 40 Seiten einen Überblick über die Grundlagen der Zellbiologie und Embryologie. In der zweiten Hälfte folgt das eigentliche Thema: Forschung an und mögliche Therapieverfahren mit Stammzellen aus Blastozysten, Nabelschnurblut oder adulten Zellkulturen sowie deren bioethische Implikationen.

Das Buch ist dank der Kürze leicht an einem Nachmittag durchzulesen und im Großen und Ganzen sowohl sachlich korrekt als auch laienverständlich geschrieben. Die bioethischen Aspekte und Zukunftsaussichten sind so behutsam abgehandelt, dass allenfalls religiöse Fundamentalisten daran Anstoß nehmen können. Angrenzende Themen wie Präimplantationsdiagnostik sowie rechtliche Grundlagen in Deutschland und der Europäischen Union kommen zur Sprache.

Einige kleinere Unachtsamkeiten könnten bei einer Neuauflage noch ausgebügelt werden. So ist die Aussage, dass Ribosomen aus RNA, »dem Zucker Ribose« und Eiweißen bestehen (S. 18), nicht völlig falsch, aber zumindest irreführend. Auf Seite 19 durchdringt bei der Befruchtung »nur der Kopf des Spermiums ohne den Schwanz« die Membran der Eizelle, während auf Seite 31 das »Spermium … nun erfolgreich und vollständig (mit Kopf und Schwanz) in die Oozyte eingedrungen« ist. Was denn nun? Es benötigen auch keineswegs alle sich geschlechtlich vermehrenden Tiere Geschlechtschromosomen. Tatsächlich wird bei vielen Arten das Geschlecht durch die Umwelt bestimmt. Wie der schleichende Verfall unserer Y-Chromosomen zeigt, ist die X/Y-Lösung womöglich langfristig nicht die beste.

Die Einnistung der Blastozyste hat nur mäßige Erfolgschancen

Doch die wichtigere Frage ist: Wird das Buch die erhoffte Kommunikationsbrücke bauen? Wird es das Niveau der gesellschaftlichen Diskussion über Stammzellforschung verbessern? Inhalt und Gestaltung der zweiten Hälfte des Buchs mit der Darstellung des eigentlichen Themas lassen einen solchen Erfolg sowohl vorstellbar als auch wünschenswert erscheinen. Aber wie viele der interessierten Laien werden den eher lehrbuchhaften ersten Teil durchstehen? Und wie viele werden sich von dem leicht herablassenden Titel abschrecken lassen?

Im Endeffekt wird das Buch – wie so viele populärwissenschaftliche Bücher – vermutlich die Wissbegierigen erreichen, doch die Streitlustigen eher nicht. Denkbar wäre auch eine breite Verwendung im Biologieunterricht der Oberstufe, damit zumindest die öffentlichen Diskussionen von morgen auf einer besseren Informationsgrundlage stattfinden als die von heute.

Michael Groß

Der Rezensent ist promovierter Biochemiker und Wissenschaftsjournalist in Oxford (England).

MATHEMATIK

Heinrich Hemme

Das Ei des Kolumbus

und weitere hinterhältige Knobeleien

Rowohlt Taschenbuch Verlag, Reinbek 2004. 141 Seiten, € 8,90

Das ist doch völlig klar, dass diese Aufgabe unlösbar ist! Zu diesem Ergebnis komme ich ein ums andere Mal, schlage nur zur Vergewisserung im Lösungsteil nach – und stelle fest, dass ich schon wieder eine Lösungsmöglichkeit nicht gesehen habe. Entweder weil ich stillschweigend eine Einschränkung vorausgesetzt habe, die so nicht im Text stand, oder weil der Text mich mit Vorsatz in die Irre geführt hat.

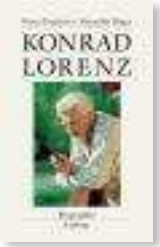
Heinrich Hemme, Physikprofessor an der Fachhochschule Aachen, verfügt mittlerweile über ein wohlbestücktes Archiv mit mathematischen Rätseln aller Art. Wie schon in seinen vorigen Büchern (siehe zum Beispiel Spektrum der Wissenschaft, Spezial Omega 2003, S. 77) weist er zu jedem Rätsel die älteste bekannte Version und interessante Varianten nach.

Der Schwierigkeitsgrad reicht von den leicht angestaubten Klassikern aus der Grundschule (»Flasche plus Pfand kosten 1,20 Euro, der Inhalt kostet einen Euro mehr als das Pfand; wie hoch ist das Pfand?«) bis zu dem berüchtigten Ziegenproblem, das vor etwas mehr als zehn Jahren die größten Geister verwirrte (Spektrum der Wissenschaft 11/1991, S. 12).

»Können Sie beweisen, dass die Hälfte von 12 genau 7 sein kann?« Es geht: Man schreibe 12 in römischen Ziffern als XII und »halbiere« sie durch eine horizontale Mittellinie.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.



BIOGRAFIE

Klaus Taschwer und Benedikt Föger

Konrad Lorenz

Biographie

Zsolnay, Wien 2003. 340 Seiten, € 24,90

Er redete mit dem Vieh, den Vögeln und den Fischen«, doch zugehört haben ihm vor allem die Menschen. Und das machte Konrad Lorenz (1903–1989) sowohl für Wissenschaftler als auch für Laien zur Symbolgestalt einer neuen wissenschaftlichen Disziplin: der vergleichenden Verhaltensforschung. Der geniale Beobachter und Vermittler war unter den Begründern der Ethologie die treibende Kraft. Seine charismatische Ausstrahlung und sein rigoroser Anspruch – von der »Gans aufs Ganze« und somit auch auf den Menschen zu schließen – führten zu begeisterter Gefolgschaft, provozierten aber auch heftigen Widerspruch.

Die Chance, sein eigenes Denken und Handeln im Kontext der leidvollen historischen Erfahrungen des 20. Jahrhunderts zu verarbeiten, ergriff Lorenz leider erst sehr spät und zudem nur halbherzig. Er hinterließ keine Autobiografie, die sich als Mittel der Selbstprüfung und Bilanz oder gar der Rechtfertigung verstehen ließe, sondern nur ein anekdotisches Fragment. Diese Lücke kann auch die fesselnde Biografie der Wiener Wissenschaftsjournalisten Klaus Taschwer und Benedikt Föger nicht restlos füllen.

Nach deren Meinung muss Lorenz als »Verkörperung seiner eigenen Lehre« begriffen werden. Leben und Werk gingen in seiner Person eine untrennbare – mitunter sogar unheilvolle – Verbindung ein. Der »Vater der Graugänse« war Parteigänger der braunen Diktatur. Und dies hat nicht nur dem Seelenfrieden des Nestors der Verhaltensforschung, sondern auch der Reputation des ganzen Fachgebiets nachhaltig geschadet.

Gestützt auf ein profundes zeitgeschichtliches und ethologisches Wissen, versuchen die Biografen vor allem jenen Widerspruch aufzulösen, der Bewunderer wie Kritiker nach wie vor beschäf- ▷

ANZEIGE

Die 5x5-Rezension des Monats von wissenschaft-online

Jean Malaurie

Mythos Nordpol

200 Jahre Expeditionsgeschichte

National Geographic Deutschland, Hamburg 2003, 400 Seiten, € 69,95

Der Franzose Jean Malaurie, heute Direktor des Zentrums für arktische Studien an der Sorbonne in Paris, zählt zu den bedeutendsten Nordpolforschern des 20. Jahrhunderts. Seit 1950 ist er regelmäßig mit Expeditionen in der Arktis und auf Grönland unterwegs und engagierte sich mehr und mehr für die Bewohner dieser Eiswelt. Kein Wunder also, dass die »Inughuit« in dem überformatigen, hervorragend illustrierten und um viele Zusatzinformationen angereicherten Band eine zentrale Rolle spielen.

Malaurie ist nicht nur eine faszinierende Geschichte der Nordpolforschung gelungen, sondern auch ein einfühlsames Porträt der Polar-Eskimos.

Aus der Rezension von
Margit Brinke und Peter Kränzle

5x5 Rubriken	Punkte 1 • 2 • 3 • 4 • 5
Inhalt	■■■■
Vermittlung	■■■■■
Verständlichkeit	■■■■
Lesespaß	■■■■■
Preis/Leistung	■■■■
Gesamtpunktzahl	22

Den kompletten Text und zahlreiche weitere Rezensionen von wissenschaft-online finden Sie im Internet unter
http://www.wissenschaft-online.de/5x5

ANZEIGE

▷ tigt: Wie konnte sich dieser wahrhaft seherische Verfechter des Wahren, Guten und Schönen auch nur ansatzweise mit der brutalen Gegenwelt der Nazis gemein machen?

In seinem Partei-Aufnahmegesuch vom 28. Juni 1938 betonte Lorenz, dass seine »ganze wissenschaftliche Lebensarbeit, in der stammesgeschichtliche, rassenkundliche und sozialpsychologische Fragen im Vordergrund stehen, im Dienste nationalsozialistischen Denkens steht«. Formulierte hier jemand allein aus naivem Enthusiasmus oder karrierestrategischem Opportunismus? War Lorenz nur ein vergleichsweise harmloser Mitläufer, an dem sich die Tragik des unpolitischen genialen Wissenschaftlers studieren lässt?

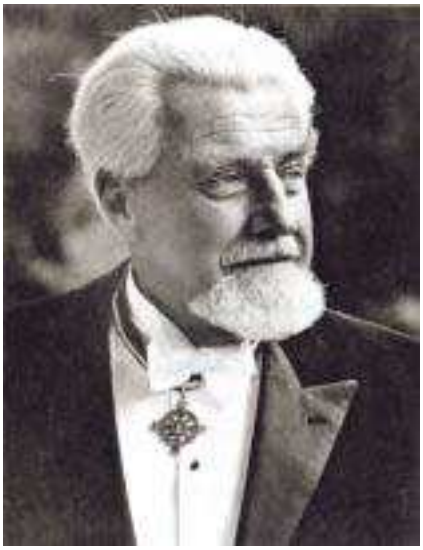
Jene nicht nur auf dem politischen Feld immer wieder auffällig gewordene Naivität des »guten Menschen von Altenberg« ist für Taschwer und Föger vor allem das Ergebnis der überlangen Sozialisation in jener märchenhaften elterlichen Villa an der Donau bei Wien. Nur ein solches Milieu konnte einen derart sensiblen, hochbegabten und zugleich auch weltfremden Zögling hervorbringen.

Eugenisches Gedankengut war in jener Zeit international weit verbreitet, konnte von den Nazis leicht vereinnahmt und zum zentralen Anliegen erhoben werden. Insofern überrascht es nicht, dass Lorenz als glühender Anhänger Darwins und bekennender Eugeniker geradewegs in den Dunstkreis der nationalsozialistischen Rassentheorie hineinschlitterte. Immerhin, die grauenhafte Praxis des Rassenwahns überstieg selbst das Vorstellungsvermögen erklärter Regimegegner. Insofern erscheint Lorenz' spätere Versicherung, er habe die ungeheuren Verbrechen lange Zeit nicht wahrhaben wollen, durchaus glaubhaft.

In seinen »Memorrhoiden«, wie Lorenz seine autobiografischen Aufzeichnungen selbstironisch bezeichnete, heißt es: »Der Vorgang, den Sigmund Freud ›Verdrängung‹ nannte, hat eine dämonische Macht über den Menschen, von der man sich keine Vorstellung macht.« Möglicherweise hat Lorenz unter seinen ideologischen Verirrungen mehr gelitten, als es selbst seine nächsten Angehörigen und Freunde wahrgenommen haben. Der greise Nobelpreisträger war sich jedenfalls der blinden Flecken seiner Erinnerung bewusst.

Die Biografen sind fair. Sie messen Lorenz nicht mit den Maßstäben der *political correctness* unserer Tage. Dennoch gleicht ihr Buch streckenweise dem Protokoll eines Untersuchungsausschusses, wobei die Gewichtung des teils belastenden, teils entlastenden Materials zumeist dem Leser überlassen bleibt.

Die wissenschaftliche Leistung des Forschers gerät dabei allerdings in den Hintergrund. Taschwer und Föger sind vor allem an der moralischen Qualität dieses Forscherlebens interessiert. Das schlägt sich auch im Anhang nieder, der neben vielen Anmerkungen und Quellenhinweisen zwar ein Literatur- und Personenregister, doch kein Sachregister aufweist. Einzelheiten etwa zur spannenden Entwicklungsgeschichte der ethologischen Begrifflichkeit findet nur wieder, wer auch weiß, dass man zur »Prägung« unter »Heinroth«, zum »Instinktbegriff« unter »Tinbergen« und zur »Kettenreflextheorie« unter »von Holst« suchen muss.



Konrad Lorenz mit seiner späteren Frau Gretl und ihrem ersten gemeinsamen Tier, einem Stoffelefanten (links); 1938 als Parteigenosse aus Begeisterung; 1969 als berühmter Forscher mit dem Orden »Pour le Mérite«

Lorenz' begeisternde Naturschilderungen, die seine weltweite Popularität begründeten, spielen in diesem Buch kaum eine Rolle. Die Biografen spekulieren – nicht ganz zu Unrecht – auf eine vorgebildete Leserschaft, für welche die schlichte Erwähnung des »Gänsekinds Martina« oder der »Dohle Tschok« augenblicklich eine schönere Welt anklingen lässt. Eine Welt, die uns Lorenz immer noch als den Inbegriff des glücklichen Naturforschers erscheinen lässt.

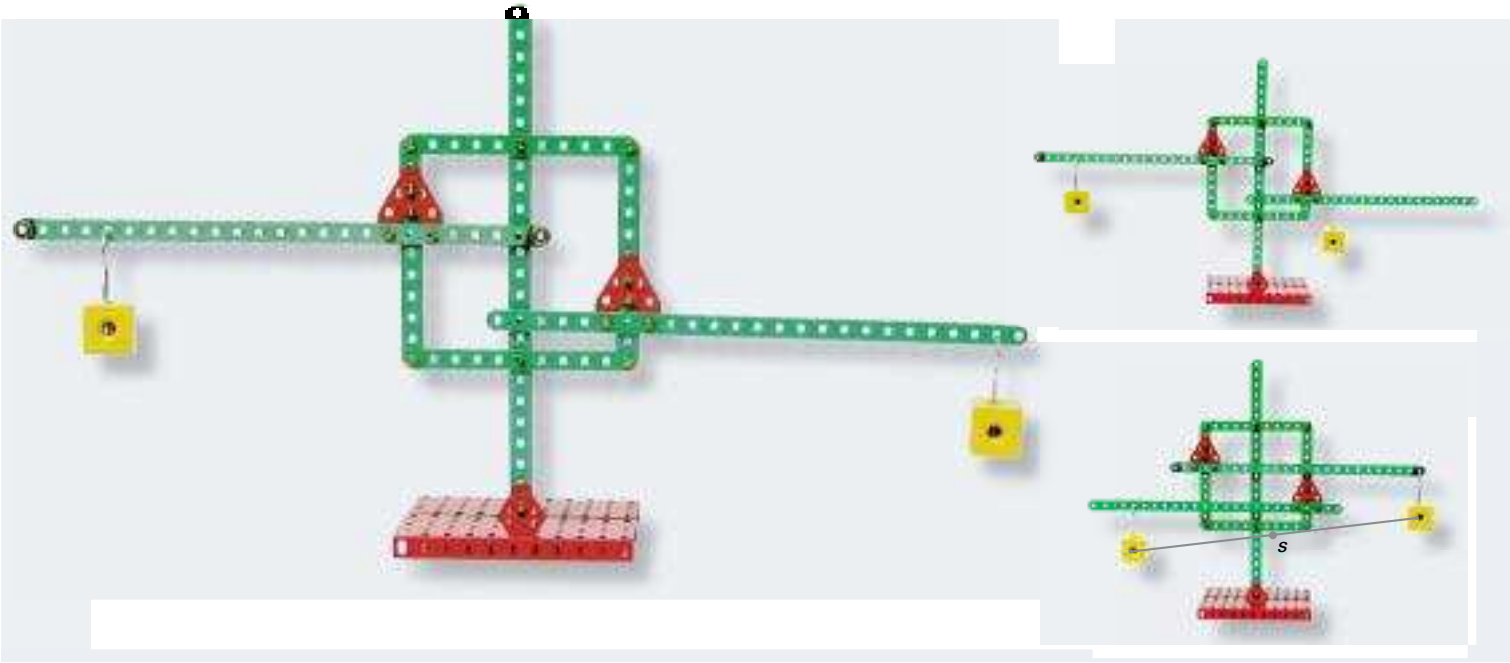
»Ich behaupte in aller Unbescheidenheit, dass ich mehr über Tiere weiß, sie tiefer verstehe als irgend ein anderer Mensch, den ich kenne.« So lautet die Selbsteinschätzung jenes »König Salomon in Lederhosen«, die von seinen kritischen Biografen uneingeschränkt geteilt wird. Denn für jeden, der Tieren wirklich nahe kommen will, bleibt Lorenz ein unverzichtbarer Lehrer.

Taschwer und Föger ist der Nachweis gelungen, dass dem Andenken einer so vielschichtigen und widersprüchlichen Persönlichkeit wie Konrad Lorenz nicht durch Vertuschung unbequemer Tatsachen gedient ist, sondern allein durch sorgfältige Wahrheitssuche.

Reinhard Lassek

Der Rezensent ist promovierter Biologe und arbeitet als freier Journalist in Celle.

ANZEIGE



Ziemlich einfache Maschinen

Waagen oder Flaschenzüge lassen sich am elegantesten über die Energie beschreiben. Denn was davon im Überschuss vorhanden ist, verkrümelt sich beizeiten.

Von Norbert Treitz

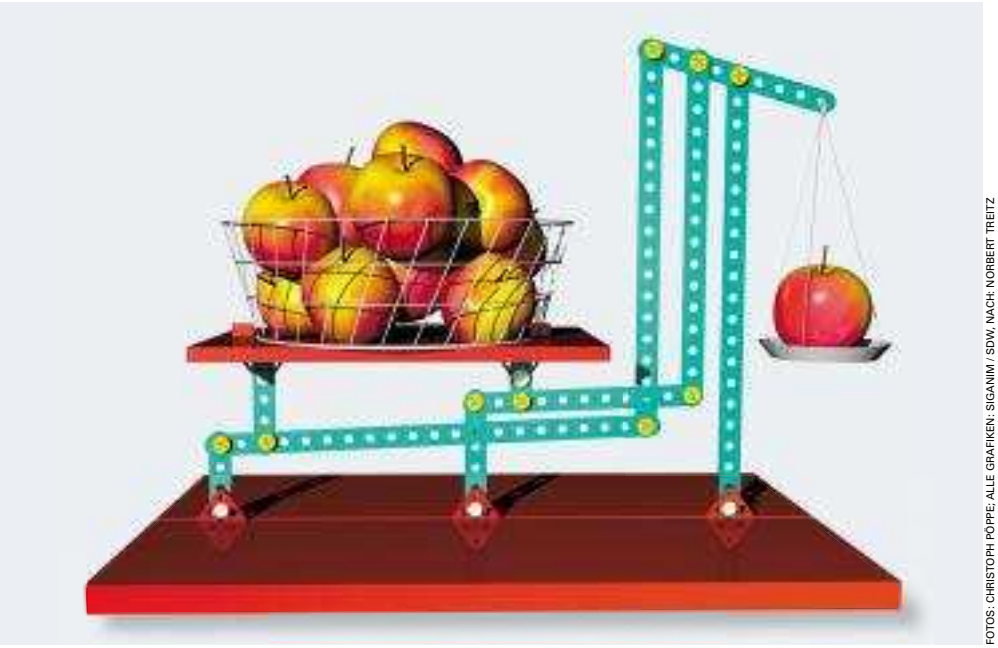
Kraft mal Kraftarm ist gleich Last mal Lastarm. Oder: Von zwei gleich schweren Menschen bringt derjenige die Wippe zum Sinken, der weiter außen sitzt. Das Hebelgesetz ist so tief in unserem Bewusstsein verankert, dass wir es auch auf das System von Gilles Personne de Roberval (1602–1675) anwenden (Bild oben). Unwillkürlich erwarten wir, dass das Gerät sich zur Seite neigt, wenn wir eines der beiden angehängten gleichen Gewichte nach außen verlagern. Ein Kollege hielt sogar ein ihm zugesandtes Manuskript, das anderes behauptete, zunächst für einen bösen Scherz. Aber in der Tat: Es neigt sich nichts!

Nicht der Apparat, sondern die physikalisch Gebildeten kommen aus ihrem – kognitiven – Gleichgewicht, raufen sich die Haare (»Ich versteh die Physik nicht mehr!«) oder flüchten sich in Ad-hoc-Definitionen darüber, was in diesem speziellen Fall als Kraftarm aufzufassen sei, damit die Hebelgesetze wieder stimmen. Kein Geringerer als Louis Poinsot (1777–1859), dem wir den Begriff des Drehmoments (und, in ganz anderem Zusammenhang, zwei nichtkonvexe reguläre Polyeder) verdanken, hat sich eine Konstruktion mit gedachten Zusatzkräften überlegt, die sich gegenseitig aufheben und nur dort Drehmomente bilden, wo es nichts zu drehen gibt. Die Konstruktion ist ziemlich kompliziert, da die Anordnung nicht weniger als sechs Drehachsen hat.

Umso verblüffender ist es, dass man die scheinbar komplizierte Sache auch viel einfacher erklären kann. Zunächst ist wegen der Symmetrie klar, dass das Gerät ohne die Gewichte in jeder Stellung in einem indifferenten Gleichgewicht ist. Aus seiner Konstruktion folgt außerdem, dass eine Hebung des einen Gewichts zwangsläufig mit einer Senkung des anderen um den gleichen Höhenunterschied einhergeht (das ganze System hat nur einen Freiheitsgrad). Bei gleich schweren Gewichten ändert also der gemeinsame Schwerpunkt seine Höhe nicht. Das gilt auch, wenn man eins der Gewichte nach außen und/oder das andere weiter nach innen hängt.

Es geht also gar nicht um Hebelarme, sondern um miteinander gekoppelte Höhenverlagerungen im homogenen Schwerefeld. Nur beim einfachen zweiarmigen Hebel (der Wippe oder der Balkenwaage) sorgen zueinander ähnliche Dreiecke dafür, dass diese Höhenänderungen sich wie die Längen der »Arme« verhalten. Das nehmen die Physiker zum Anlass, aus ihnen und den Kräften den nicht besonders elementaren Begriff des Drehmoments zu definieren.

Dieser wird aber erst dann wirklich bedeutsam, wenn es um die Belastungsgrenzen einer Waage geht. Aussagen über Gleichgewichte diesseits solcher Grenzen gelingen viel einfacher mit Energiebetrachtungen. In besonders einfachen Fällen – wie unserem – laufen sie auf die Frage hinaus, ob der gemeinsame



FOTOS: CHRISTOPH PÖPPE; ALLE GRAFIKEN: SIGANIM / SDW, NACH: NORBERT TREITZ

Das Hebelsystem von Roberval (links), mit dem Metallbaukasten gebaut. Es kommt nicht darauf an, an welche Stelle der beiden waagerechten Stangen man die Gewichte hängt. Die Stangen dürfen sogar über die Mitte des Geräts hinaus auf die »falsche« Seite ragen (kleine Bilder). *S* ist der gemeinsame Schwerpunkt beider Gewichte. Rechts eine Dezimalwaage: Wie man an den Löchern abzählen kann, hebt (senkt) sich die Lastplatte links nur um ein Zehntel des Wegs, den das Gewicht im Körbchen rechts sich senkt (hebt).

Schwerpunkt der beweglichen Teile bei einer infinitesimalen Bewegung (»virtuellen Verrückung«) auf- oder absteigt.

Was ist Lageenergie? Eine Testfrage für angehende Physiklaboranten lautete sinngemäß: »Ist der Schwerpunkt eines Systems im stabilen Gleichgewicht tiefer als im Ungleichgewicht?« »Ja«, stand als Vorgabe im Antwortenverzeichnis. Leider war die eigentlich korrekte Antwort »Manchmal« nicht vorgesehen.

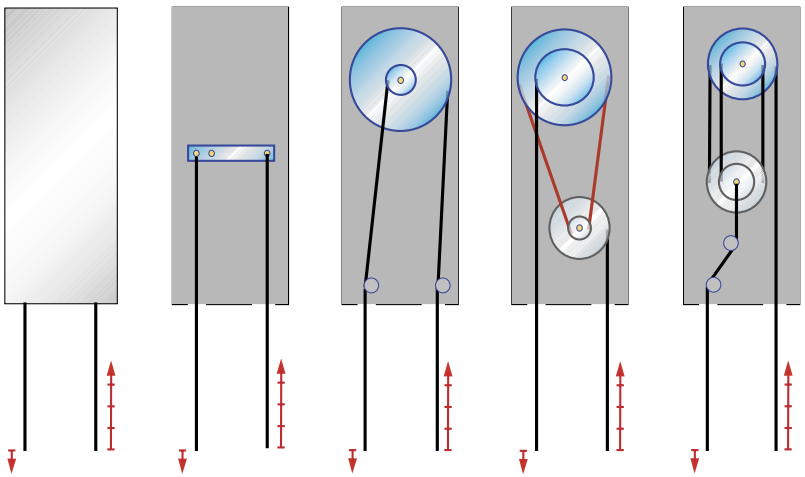
Die Behauptung trifft dann zu, wenn die entscheidende potenzielle Energie die des homogenen Schwerefelds ist. Bei der Federwaage ist das offensichtlich nicht der Fall. Die potenzielle Energie hat nämlich außer dem mit der Höhe linear steigenden Term des Schwerefelds noch einen elastischen, der quadratisch mit der Verlängerung oder Verkürzung der Feder gegenüber ihrer neutralen Länge geht. Die Summe beider Energien hat offenbar bei einer gewissen Höhe ein Minimum, und um dieses herum kann die Last an der Federwaage auch schwingen.

Sind nun die »starren« Stangen der Roberval-Waage etwa nicht elastisch, oder wenn doch: Wieso kann man das vernachlässigen? Nach dem Hooke'schen Gesetz ist die Auslenkung x einer Feder der angreifenden Kraft F proportional: $F = Dx$ mit einer Federkonstanten D. Die elastische Energie ist dann $W = Dx^2/2$, was offenbar bei kleinen x sehr wenig ist. Deutlicher wird es, wenn man das für eine gegebene Kraft F als $W = F^2/(2D)$ schreibt: Je größer die Federkonstante D (das heißt je härter das Material), desto weniger trägt die Elastizität zur Energiebilanz bei, im idealen Grenzfall starrer Körper gar nicht. Bei dem Wort »Lageenergie« ist also nicht immer klar, ob nur die Energie des Schwerefelds (im homogenen Fall die Höhenenergie) gemeint ist oder alle Arten potenzieller Energie, insbesondere die der Elastizität.

Waagen: Die kleinste Ungleichheit der Gewichte lässt die Roberval-Waage theoretisch zu einer Seite schlagen. Ein Zeiger (das sprichwörtliche »Zünglein an der Waage«) nach oben oder unten an einer der beiden drehbaren Stangen macht das Gleichgewicht labil beziehungsweise stabil. In der stabilen Form kennen wir das Roberval-Hebelsystem als Gemüsewaage vom Wochenmarkt, bei der es bekanntlich (?) keine Rolle spielt, ob man die Äpfel oder die Gewichte weiter innen oder weiter außen auflegt: Die Kundin verlässt sich auf das Eichamt, und mit Recht, denn dort sitzen Leute, die Physik können.

Bei größeren Mengen von Energieträgern (Kartoffeln, Kohlen) ist es bequem, wenn man nicht auch noch so große Gewichte handhaben muss. Man nimmt daher eine Waage, bei der ein Gewicht mit einer zehnmal so großen Last ins Gleichgewicht kommt (Dezimalwaage). Eine Roberval-Waage mit dieser Eigenschaft hat wie eine gewöhnliche Balkenwaage zwei »Hebel«, deren einer zehnmal so lang ist wie der andere; aber die »Waagschalen« bleiben in jeder Position horizontal und könnten im Prinzip beliebig nach rechts oder links verlängert werden, ohne dass die Wirkung einer aufgelegten Last sich verändern würde.

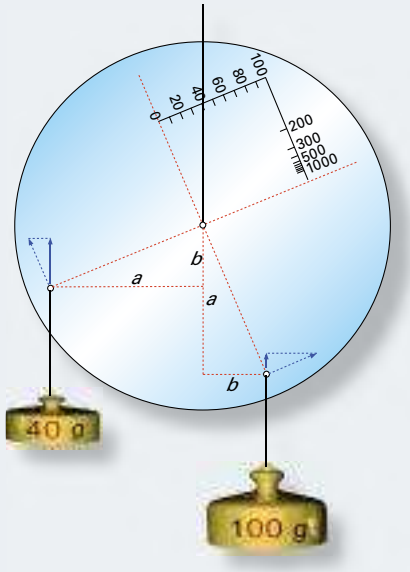
Für sehr große Gewichte wie zum Beispiel ganze Lastwagen sind auch Zentesimalwaagen (Verhältnis 1 : 100) gebräuchlich. ▷



Verschiedene Realisierungen eines Getriebes mit Übersetzung

Elementare Briefwaagen

Die Scheibe, die als Gewichtsmessgerät dient, muss nicht kreisförmig sein, sondern kann eine beliebige Form haben; sie muss nur genau im Schwerpunkt aufgehängt sein. Ihre Masse geht nicht in das Messergebnis ein. Die Skala gilt für den Fall, dass rechts 100 Gramm angehängt sind.



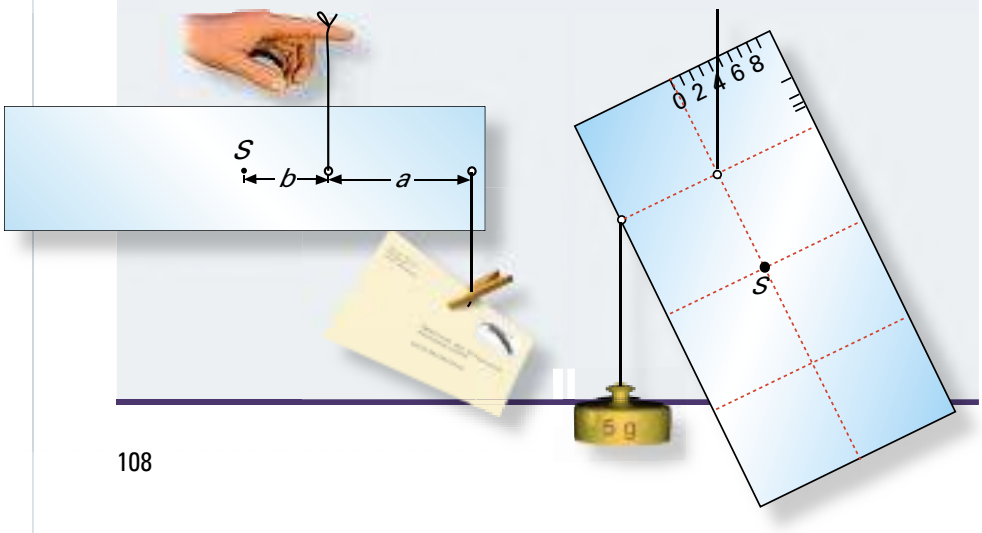
In der gezeigten Position verhalten sich die Katheten der eingezeichneten (allesamt zueinander ähnlichen) rechtwinkligen Dreiecke wie die angehängten Gewichte. Bei einer kleinen Drehung (durch die Pfeile stark übertrieben angedeutet) bleibt die potenzielle Energie unverändert: Was durch Anheben des einen Gewichts hinzukommt, geht durch Absinken des anderen verloren, denn die Höhenunterschiede sind umgekehrt proportional zu den Gewichten. Bei größeren Drehungen in die eine oder andere Richtung müsste das steigende Gewicht mehr Energie bekommen, als das sinkende abgibt; es wäre demnach eine Zugabe von Energie nötig. Also befindet sich das System aus Waage und Schwerefeld im stabilen Gleichgewicht.

Die Primitivform dieser Waage (Bild rechts unten) besteht aus einem schlichten Rechteck aus Karton. Man kann es sich in eine obere und eine untere Hälfte zerlegt denken. Die obere ist wie die oben abgebildete Kreisscheibe im Schwerpunkt aufgehängt, die untere dient als Gegengewicht.

Mit der Drehmomentbilanz an der zentralen Achse der Scheibe kommt das gleiche Ergebnis heraus, allerdings mit größerem begrifflichem Aufwand.

Will man noch mehr (hier) entbehrliches Wissen einbringen, so kann man die Skala bogenförmig als Viertelkreis um den Mittelpunkt machen und feststellen, dass die Bezifferung dann über die Funktionen Tangens und Cotangens zu bestimmen ist, denn die lineare Skala (und ihre reziproke Fortsetzung) liegen auf Tangenten an diesen Viertelkreis.

Die Lineal-Briefwaage verwendet die Masse *M* des Lineals als Vergleichsgröße. Auf einer Seite einer Geraden durch den Schwerpunkt *S* bringt man mehrere Bohrungen an. Das Bild zeigt nur zwei davon mit den Abständen *a* und *b*. Durch Kippen aus der Waagerechten (daher der Name) zeigt die Linealwaage an, ob die rechts angehängte Masse *m* größer oder kleiner als *Mb*/*a* ist. Für jede im Portotarif vorkommende Intervallgrenze kann man ein Loch für die Aufhängung der Waage anbringen und die Last immer an das linke Loch hängen.



▷ Streng genommen ist diese Waage nur nahe der Position mit waagerechten und senkrechten Stangen indifferent, aber die Fehler sind sehr klein.

Das Wort »Gleichgewicht« ist in solchen Fällen ein Missbrauch der Umgangssprache, denn auf der Dezimalwaage oder allgemein beim ungleicharmigen Hebel sind im Gleichgewichtszustand die Gewichte eben nicht gleich. Was ist dann aber wirklich gemeint? In einem System mit einem einzigen Freiheitsgrad wie einer Waage ist die potenzielle Energie als Funktion einer einzigen Koordinate, zum Beispiel des Winkels der drehbaren Stangen, beschreibbar. Gleichgewicht herrscht genau da, wo der Graph dieser Funktion eine Horizontalstelle hat: im stabilen Gleichgewicht ein Minimum, im labilen ein Maximum. Wenn der Graph ein ganzes Stück horizontal verläuft, herrscht indifferentes Gleichgewicht.

Briefwaagen: Die klassische Bürobriefwaage mit umklappbarem Gegengewicht zum Umschalten zwischen den beiden Messbereichen hat ebenfalls ein Parallelogrammgestänge, zumindest für die Waagschale, auf welcher der Brief liegt.

Eine ausgesprochen einfache Briefwaage mit einem theoretisch unendlichen Messbereich zeigt das Bild rechts unten in nebenstehendem Kasten. In dieser Position ist das angehängte Gewicht halb so schwer wie das Rechteck. Die Skala ist zwischen 0 und dem vollen Gewicht des Rechtecks linear und für »den Rest« bis unendlich linear zum Kehrwert, aber auf der anderen Rechteckseite.

Für das Briefporto ist nur wichtig, in welchem Gewichtsintervall ein Brief liegt. Ein Lineal mit geeigneten Bohrungen und eine Wäscheklammer ergeben daher ein nützliches Gerät (links im Kasten).

Das Räderwerk in der Black Box: Aus einem Kasten schauen unten zwei Fäden heraus. Zieht man den einen um *dh* nach unten, so wandert der andere um *x*·*dh* nach oben. Wie muss man sie belasten, damit Gleichgewicht besteht? Offensichtlich im Verhältnis *x*:1, also umgekehrt wie die Höhenänderungen. Was in dem Kasten ist, kann sehr viele ver-

Drei Sorten Flaschenzüge: links der Differenzialflaschenzug, in der Mitte der gewöhnliche und rechts der Potenzflaschenzug (mit Potenzen von 2). Die Übersetzung ergibt sich auch hier geometrisch aus dem Verhältnis der Höhenänderungen, jedenfalls wenn man das Gewicht gewisser Seilstücke vernachlässigt.

schiedene Namen haben (Bilder S. 107 unten): Wellrad, Zahnräder, Kettenübersetzung, Flaschenzug, hydraulische Presse. Bei allen diesen Maschinen kann man – wie bei den Bauten aus dem Metallbaukasten, aber notfalls durch Messung von Längen statt Zählung der Lochabstände – geometrisch das Übersetzungsverhältnis der Wegstücke bestimmen und daraus dessen Kehrwert, das Verhältnis der Gleichgewichtsbelastungen.

Mit Kräften oder Drehmomenten kommt das Gleiche heraus, aber sie sind als Vektoren komplizierter als die skalare Größe Energie. Vor allem kann man bei der Energie stets sagen, von welchem Objekt zu welchem anderen sie wandert, zum Beispiel aus dem Schwerefeld in den fallenden Apfel. Leider verunklart man das oft durch Formulierungen wie »Verrichten von Arbeit am Apfel«. Verrichten wir auch Zahlungen am Sparschwein, oder werfen wir das Geld nicht einfach hinein?

Kräfte und Drehmomente treten dagegen in Statik und Quasistatik (Bewegungen mit fast nicht vorhandener Beschleunigung) in Paaren auf, die sich jeweils zu null ergänzen: Zieht der Apfel am Baum oder der Baum am Apfel oder beide am Ast? Dass Kräfte anschaulicher seien als die Energie, ist eine Täuschung. Wir verwechseln die Tätigkeit unserer Muskeln mit dem physikalischen Kraftbegriff, was auch innerhalb der Fachsprache gelegentlich zu Verwirrung führt.

Ein Schriftsteller hat einmal gesagt: Die Physiker sind schreckliche Menschen, sie erklären unverständliche Erscheinungen mit unverständlichen Naturgesetzen. Das ist zwar nicht falsch, trifft aber nur einen schlechten Unterricht: für jede Sorte von einfachen Maschinen ein Experiment, ein Lehrsatz und eine Rechenaufgabe. Die Physiker sind in Wirklichkeit sehr elegante Menschen. Sie erklären sehr viele unverständliche Erscheinungen mit sehr wenigen unverständlichen Naturgesetzen. So kann man alle einfachen Maschinen gemeinsam erklären: Es gibt genau dann ein stabiles Gleichgewicht, wenn jede mögliche Verlagerung ihrer Teile die Zufuhr potenzieller Energie erfordert.

Dass die Natur solche Minima der potenziellen Energie liebt, ist kein eigenes Naturgesetz, sondern eine Folge des Prinzips von der Nichtabnahme der Entropie (II. Hauptsatz): Wenn die Energie die Gelegenheit hat, sich weiträumig zu verkrümeln, so tut sie das und kommt durch Zufall kaum wieder zurück. Sie hinterlässt dabei stabile Gleichgewichte, und ohne solche Reibungsprozesse gäbe es überall nur ewiges Schwingen und Zappeln. ◁

Norbert Treitz ist apl. Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen. Seine Vorliebe für erstaunliche und möglichst freihändige Versuche und Basteleien sowie anschauliche Erklärungen dazu nutzt er nicht nur für die Ausbildung von Physiklehrkräften, sondern auch zur Förderung hochbegabter Kinder und Jugendlicher.

Nüsse & Rosinen. Von Norbert Treitz. CD mit Buch. Harri Deutsch, Frankfurt (Main), in Vorbereitung

Brücke zur Physik. Von Norbert Treitz. 3. Auflage, Harri Deutsch, Frankfurt (Main) 2003

Spiele mit Physik! Von Norbert Treitz. 4. Auflage, Harri Deutsch, Frankfurt (Main) 1996

ANTHROPOLOGIE

Bandwürmer
Zeugen der Menschwerdung

Die Darmparasiten erzählen eine Menge über die Evolution des Frühmenschen, seine Ernährungsweise und seinen Umgang mit Haustieren.

Von Pat Shipman

Vom Geparden über die Gazelle zum Menschen: Mit dem Übergang zu fleischlicher Kost erbten unsere Vorfahren Raubtier-Bandwürmer, deren Larven in afrikanischen Huftieren lebten.

Verblüfft las ich kürzlich eine wissenschaftliche Arbeit, in der amerikanische und englische Forscher die menschliche Evolution von den Würmern her aufrollen. Angesichts dieses genialen Einfalls ärgert mich beinahe, dass mir nicht längst selbst die Idee kam, dort nach Hinweisen auf die Ernährung und Lebensweise des frühen Menschen zu suchen, mein Hauptforschungsgebiet seit Jahrzehnten.

Denn viele Parasiten haben sich während der Evolution auf ihre Wirtsarten spezialisiert. Das gilt auch für die Bandwürmer, eine Fraktion der Plattwürmer. Drei ihrer Arten haben sich speziell an den Menschen angepasst:

- der mindestens zehn Meter lange Rinderbandwurm (wissenschaftlich *Taenia saginata*), dessen Larven in Muskulatur und Organen von Rindern leben
- die mit ihm eng verwandte Art *Taenia asiatica*, die von Schweinen, gelegentlich auch Rindern übertragen wird und insbesondere in Asien vorkommt
- und der bis etwa drei Meter lange Schweinebandwurm (*Taenia solium*), dessen Larven der Mensch meist mit Fleisch oder Leber dieses Viehs aufnimmt; sie parasitieren aber auch in einigen anderen Tieren sowie gelegentlich im Menschen.

Die meterlangen geschlechtsreifen Stadien dieser drei Bandwurmarten können allein im menschlichen Darm existieren. Der Mensch wirkt somit als ihr Haupt- oder Endwirt. In dem Fall stellen unsere Haustiere, insbesondere Rinder und Schweine, lediglich Zwischenwirte für deren Larven dar. Diese nimmt der

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Mensch mit Innereien und rohem oder halb gegartem Fleisch von infiziertem Vieh auf. Später scheidet er die befruchteten Eier aus. Damit wiederum infiziert sich das Nutzvieh über verunreinigtes Futter.

Was Eric Hoberg vom US-Landwirtschaftministerium und seine Kollegen zur Abstammung der drei Bandwürmer des Menschen entdeckten, kehrt etablierte Ansichten der Parasitologie um. Behaupten die Wissenschaftler doch nun, unsere Vorfahren hätten die Plattwürmer schon in Urzeiten, vor vielen hunderttausend Jahren, unfreiwillig an unsere Gattung adaptiert – nicht sie erst wesentlich später von Haustieren »erworben«, wie bisher vermutet. Nach dieser lang akzeptierten Deutung brachten vielleicht Hunde die Bandwürmer mit – oder eher noch Rinder und Schweine, die der Mensch vor rund 10 000 Jahren zu domestizieren begann.

Vermächtnis der afrikanischen Savannen

Die Lebensweise der Bandwürmer mag unappetitlich erscheinen, besticht aber durch Perfektion. An ihr parasitisches Dasein und die notwendigen Wirtswechsel in ihrem komplizierten Lebenszyklus sind diese Schmarotzer hervorragend angepasst. In Tier und Mensch gelangen sie mit deren Nahrung. Sie müssen also jeweils in passender Form aufgenommen werden. Die systematische Gruppe, zu der die Menschenbandwürmer gehören, nutzt stets Räuber-Beute-Beziehungen aus. Das bedeutet: Das Raubtier frisst ein infiziertes Tier und füttert später in seinem Darm ungewollt den erwachsenen, geschlechtsreifen, Eier produzierenden Bandwurm; der Pflanzenfresser nimmt mit Raubtierkot verunreinigtes Futter auf und beherbergt die Larven, die durch die Darmwand dringen und sich in Geweben einnisten.

Hoberg und seine Kollegen erkannten, dass auch der Mensch in dieses Schema passt. Für die in seinem Darm lebenden Bandwurmarten gibt er den Part des Fleischfressers ab. Das impliziert zugleich, dass unsere Gattung frühestens zum Hauptwirt werden konnte, als unsere Vorfahren einigermaßen regelmäßig tierische Nahrung verzehrten. Nur unter dieser Voraussetzung, sozusagen unter diesen ökologischen Bedingungen, vermochten sich die drei menschenspezifischen Arten der Plattwürmer zu entwickeln. Somit geben die Abstammungsverhältnisse der Menschenbandwürmer über frühere menschliche Ernährungsgewohnheiten Aufschluss. Spätestens seit unsere Vorfahren Bandwürmer trugen, müssen sie oft genug Fleisch verzehrt haben, sodass sie deren geschlechtsreifen Stadien zuverlässig Lebensraum boten.

Nur der Vollständigkeit halber: Vom gefürchteten Fuchs- und vom Hundebandwurm, die mit den Menschenbandwürmern nicht verwandt sind, soll hier nicht die Rede sein. Für diese Arten stellt der Mensch einen eher zufälligen Zwischenwirt für die Larven dar – er übernimmt, wie gelegentlich auch beim Schweinebandwurm, dann die Funktion des Pflanzenfressers. Zwar kann er an den entstehenden großen Zysten in Leber oder Gehirn lebensgefährlich erkranken. Doch Hauptwirt sind Fuchs beziehungsweise Hund.

Wann aber übernahm der Mensch gewissermaßen Bandwürmer – und vor allem: auf welchem Wege, von welchen Tieren? Wann hat sich der Zyklus eingespielt, in dem diese Schmarotzer zwischen dem Menschen und seinem Hausvieh wechseln?

Würde das Szenario zutreffen, nach dem erst Haustiere den Parasiten übertrugen, dann wären die menschlichen Bandwürmer erst vor allenfalls 10 000 Jahren entstanden. In der Evolutionsgeschichte ist das kaum ein Wimpernschlag. In so kurzer Zeit dürften sich die Würmer kaum auseinander entwickelt haben – vorausgesetzt, erst später spalteten sie sich in mehrere Arten auf. Des Weiteren müssten sich nahe Verwandte der Menschenbandwürmer bei Tierarten finden, aus denen wir einst unsere Haustiere züchteten, also etwa bei Wölfen beziehungsweise eurasischen Wildschweinen und Wildrindern.

Hoberg und sein Team stellten nach morphologischen Kriterien einen Stammbaum aller Arten der Plattwurmgattung *Taenia* auf – die insgesamt mehrere Dutzend bilden. Als die beiden nächstverwandten, somit auch jüngsten Arten ermittelten sie zwei der Menschenparasiten: den Rinderbandwurm *Taenia saginata* und die Art *Taenia asiatica*. Den Zeitpunkt ihrer Aufspaltung aus einem gemeinsamen Vorfahren maßen die Forscher nach inzwischen bewährter Manier mit der genetischen Mutationsuhr. Diese molekulare Uhr soll in relativ gleichmäßiger Rate ticken. Die Zahl der Mutationen eines definierten genetischen Abschnitts zeigt daher ungefähr die verstrichene Zeit an, wenn man sie durch Vergleich mit bekannten Trennungszeiten anderer verwandter Linien eicht.

Bei dieser Messung ergab sich ein erstaunlich hohes Alter der beiden ▷

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Eine Larve des Rinderbandwurms hat sich im Rindermuskel zur »Finne« entwickelt (oben). Im Menschendarm entsteht daraus ein bis über zehn Meter langer Wurm mit winzigem Kopf (Pfeil).

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Der nur millimetergroße Kopf des Schweinebandwurms (hier koloriert) trägt einen Hakenkranz. Bandwürmer verankern sich auch mit ihren Saugnäpfen in der Darmwand.

▷ Parasiten: Schon vor 780 000 bis 1,71 Millionen Jahren müssen sich demnach die beiden Arten getrennt haben. Nach Meinung der Forscher kann das angesichts der sonstigen Verwandtschaftsverhältnisse eigentlich nur geschehen sein, als die Schmarotzer den Menschen bereits besiedelt hatten.

Demzufolge wurde unsere Gattung zum Hauptwirt von Bandwürmern, lange bevor wir uns Haustiere hielten und sogar bevor überhaupt der *Homo sapiens* erschien. Zu jener Zeit lebte der *Homo erectus* (dessen afrikanische Vertreter manche Forscher heute als *Homo ergaster* bezeichnen) oder vielleicht noch der *Homo habilis*, gewissermaßen der Urvater der menschlichen Gattung.

Weiteren Aufschluss brachte der genauere Blick auf die gesamte Verwandtschaft unserer Bandwürmer. Hoberg und seinen Kollegen fiel auf, dass alle den Menschenbandwürmern nahe stehenden Arten in afrikanischen Raubtieren parasitieren. Verwandte des Schweinebandwurms etwa leben in Hyänen, Wildhunden, Löwen, Geparden und Schakalen. Die Plattwürmer, die mit dem Rinderbandwurm und *T. asiatica* am engsten verwandt sind, benutzen als Hauptwirt insbesondere Löwen.

Wie kamen unsere Vorfahren an diese Parasiten? Zwar lebten die frühen Menschen in Afrika über lange Zeiträume in denselben Ökosystemen wie die großen Raubtiere. Ganz sicher jedoch hielten sie sich keine Löwen oder Hyänen als Haustiere. Vielmehr waren diese Fleisch fressenden großen Säuger in der afrikanischen Savanne die schärfsten Konkurrenten des Frühmenschen, als er zum Jäger oder Aasesser wurde.

Preis für die Umstellung vom Vegetarier zum Fleischfresser

Eben das sei der Schlüssel, vermutet Hobergs Team. Die Zwischenwirte für die Larvenstadien dieser Bandwürmer sind sämtlich afrikanische Huftiere: Hauptsächlich eine Reihe von Antilopen, aber auch unter anderem der Kaffernbüffel gehören dazu. Vermutlich, so das neue Szenario, aßen die Frühmenschen infiziertes Fleisch. Mit der Zeit passten diese Bandwurmarten sich dann immer besser an den Menschen an. Irgendwann hatten sich die neuen Linien so gut darauf eingerichtet, dass ihr geschlechtsreifes Stadium in anderen Fleischfressern nicht mehr leben konnte.

Die neuen Arten adaptierten sich wohl auch allmählich an das Beutespektrum des Menschen – und sehr viel später an dessen Haustiere. Es fällt auf, dass etwa die Larven des Schweinebandwurms nicht mehr wie seine nahen Verwandten Antilopen infizieren. Vielmehr leben seine Larven außer in Hausschweinen mitunter in Affen – manchmal auch im Menschen –, in verschiedenen kleinen Säugetieren und in wilden Schweinen. Die Bandwurmanalysen zeigen somit nicht nur an, wann ungefähr unsere Vorfahren zum regelmäßigen Fleischkonsum übergingen. Die Studie liefert außerdem Anhaltspunkte über die menschlichen Ernährungsgewohnheiten in früher Zeit.

Hobergs Gruppe wagt sich noch weiter vor. Sie postuliert, der Mensch habe sich im Afrika südlich der Sahara zweimal, mit jeweils einem anderen Bandwurm, infiziert. Im einen Fall entstand daraus später der Schweinebandwurm. Im anderen Fall entwickelten sich nach einiger Zeit durch Aufspaltung zwei Arten: *Taenia asiatica* einerseits und der Rinderbandwurm andererseits – und zwar, so spekulieren die Forscher, nachdem einige Frühmenschengruppen Eurasien besiedelten. Fossilien belegen heute, dass *Homo* vor rund 1,7 Millionen Jahren in Asien auftauchte. Dort fand er andere Beutetiere vor als auf seinem Heimatkontinent. Und sehr viel später steckte er seine Haustiere damit an. Nicht sein Vieh, sondern der Mensch war mit diesen Würmern zuerst verseucht.

Meines Erachtens offenbart die Studie auch einiges über den Lebensraum und die besonderen Jagdgewohnheiten jener afrikanischen Frühmenschen. Die bisherigen Modelle dazu stützen sich unter anderem auf Funde von Steinwerkzeugen und Tierfossilien. Die neuen Ergebnisse über die Bandwürmer könnten einige der Vermutungen klären helfen. Wahrscheinlich nutzte der frühe *Homo* verschiedene ökologische Habitate und verschaffte sich Fleisch in unterschiedlicher Manier. Er muss beispielsweise kein reiner Hetzjäger gewesen sein, ebenso kein reiner Aasesser. Auch die Wildtiere, die heute Schweinebandwurmlarven beherbergen können, leben in recht verschiedenartigen Umwelten.

Die Studie Hobergs und seiner Kollegen stimmt nachdenklich. Die proteinreiche Fleischnahrung, aber auch die Herausforderung, Fleisch zu beschaffen, gelten als Antriebe für die Evolution des großen menschlichen Gehirns (siehe Spektrum der Wissenschaft 5/2003, S. 30). Die Umstellung vom überwiegenden Pflanzenfresser zum Jäger und Aasesser erlaubte dem Menschen schließlich, sich weltweit auszubreiten. Man könnte fast behaupten, die Bandwürmer hätten es pfiffiger angestellt. Sie nahmen einfach heimlich an den energiereichen Mahlzeiten des Menschen teil – und wurden mit ihm, und auf seine Kosten, zum Kosmopoliten. Der Siegeszug des Menschen über die Welt verliert aus der Wurmperspektive einiges an Glanz. ◁

AUTORIN UND LITERATURHINWEIS

Pat Shipman ist außerordentliche Professorin für Anthropologie an der Staatsuniversität von Pennsylvania in University Park.

© American Scientist Magazine (www.american scientist.org)

Out of Africa: origins of the Taenia tapeworms in humans. Von Eric P. Hoberg et al., in: Proceedings of the Royal Society of London B., Bd. 268, S. 781, 2001

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

PREISRÄTSEL

Binäres Spielchen

Von Pierre Tougne

Zwei Informatiker, Marc und Ben, spielen. Marc schreibt eine Folge der binären Ziffern 0 und 1 auf, indem er mit einer 1 beginnt und ständig weitere Ziffern anfügt. Dabei entstehen der Reihe nach Binärzahlen, zum Beispiel:
1 (1), 10 (2), 100 (4), 1001 (9),
10010 (18), 100100 (36), …
(in Klammern die Dezimaldarstellung). Ben darf Marc jederzeit unterbrechen und selbst eine der Ziffern 0 oder 1 anhängen. Ist die so entstandene Zahl durch eine in einer Liste vorkommende Primzahl teilbar, so hat Ben gewonnen. Wenn Ben dies nie schafft, dann hat Marc gewonnen. Enthält die Liste der Primzahlen die Zahl 73, dann gewinnt im obigen Beispiel Ben, indem er an die 100100 eine 1 anhängt und damit 1001001 (73) erzeugt.

Enthält die Primzahlliste eine 2 oder 3, dann gewinnt immer Ben: Nach der ersten 1 hängt er sofort eine weitere 1 an und erreicht 11 (3); durch Anhängen einer 0 an beliebiger Stelle erreicht er eine durch 2 teilbare Zahl. Besteht die Liste der Primzahlen ausschließlich aus der 7, so gewinnt Marc, wenn er nach der ersten 1 nur noch Nullen anfügt. Ähnliches gilt für die Primzahl 5. Hier kann Marc nach der ersten 1 immer abwechselnd 1 und 0 anhängen. Der Beweis sei Ihnen überlassen.

Finden Sie das in der Summe kleinste Pärchen Primzahlen, das nicht die Zahlen 2 und 3 enthält, bei dem
a) Ben gewinnt,
b) Marc gewinnt.
Und wer ist der Gewinner der Primzahlliste 7, 11, 13, 17?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir drei Puzzles »Kristall«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 12. Oktober 2004, eingehen.

Lösung zu »Spaziergang auf einem Schachbrett« (08/04)

Auf dem ersten (freien) Brett gibt es 3432 mögliche Wege, wenn nur waagerecht und senkrecht gezogen werden darf (48639, wenn auch diagonale Züge erlaubt sind). Beim zweiten Brett mit den Hindernissen sind es 982 (11388), beim dritten 828 (13760) und beim vierten 712 (9960).

Am einfachsten sind diese Anzahlen rekursiv zu ermitteln: Ausgehend vom Startfeld S trage man, nach rechts und nach unten fortschreitend, in jedes Feld die Anzahl der Wege ein, auf denen es erreicht werden kann. Das ist für jedes noch zu füllende Feld die Summe der Zahlen in den Feldern, von denen aus dieses Feld in einem Schritt erreichbar ist. Dieses Sortiment an »Vorgängerfeldern« ist verschieden je nachdem, ob diagonale Züge verboten (Bild links) oder erlaubt sind (Bild oben) und ob gewisse Felder ganz gesperrt sind (rot, rechte Teilbilder).

S	1	1	1
1	2	3	
1	3	6	
1	4		

S	1	1	1
1	0	1	
1	1	2	
1	2		

S	1	1	1
1	3	5	
1	5	13	
1	7		

S	1	1	1
1	0	2	
1	2	4	
1	4		

Der Gewinner des Experimentierkastens »Kosmos Electro E 2000« ist Joachim Schwaninger aus Freiburg.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

ANZEIGE

BRYAN CHRISTIE DESIGN

Nanosensoren für Massenspeicher

Es wird noch nicht die nächste Generation von Festplatten sein, die eine neue Speichertechnik erfordert. Doch der »außerordentliche Magnetowiderstand« steht bereits in den Startlöchern, die Leistungsdaten nach oben zu treiben

WEITERE THEMEN IM NOVEMBER

Giganten der Luft – Flugsaurier

Im Erdmittelalter beherrschten Riesenreptilien mit bis zu zwölf Meter Flügelspannweite die Lüfte

ALAIN BÉNÉTAUT

Lernen im Schlaf – kein Traum

Wenn der Mensch sich zur Ruhe bettet, schaltet das Gehirn nur scheinbar ab. Tatsächlich nutzt es die Nacht, um Gedächtnisinhalte zu speichern

LANDESAMT FÜR ARCHÄOLOGIE SACHSEN-ANHALT

Der geschmiedete Himmel

Die 3600 Jahre alte Himmelsscheibe von Nebra gilt als älteste konkrete Darstellung der Gestirne. Sie wirft ein neues Licht auf astronomisches Wissen und religiöse Vorstellungen der Bronzezeit-Menschen

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Das Wunder der über 120-Jährigen

Wie tickt unsere Lebensuhr? Können wir alle so alt werden wie die Französin Jeanne Calment, die 122-jährig verstarb?